

21 cm線揺らぎの パワースペクトルの最近の進展

吉浦伸太郎 (国立天文台), 2021/11/17~19, @ 観測的宇宙論ワークショップ

暗黒時代から宇宙再電離

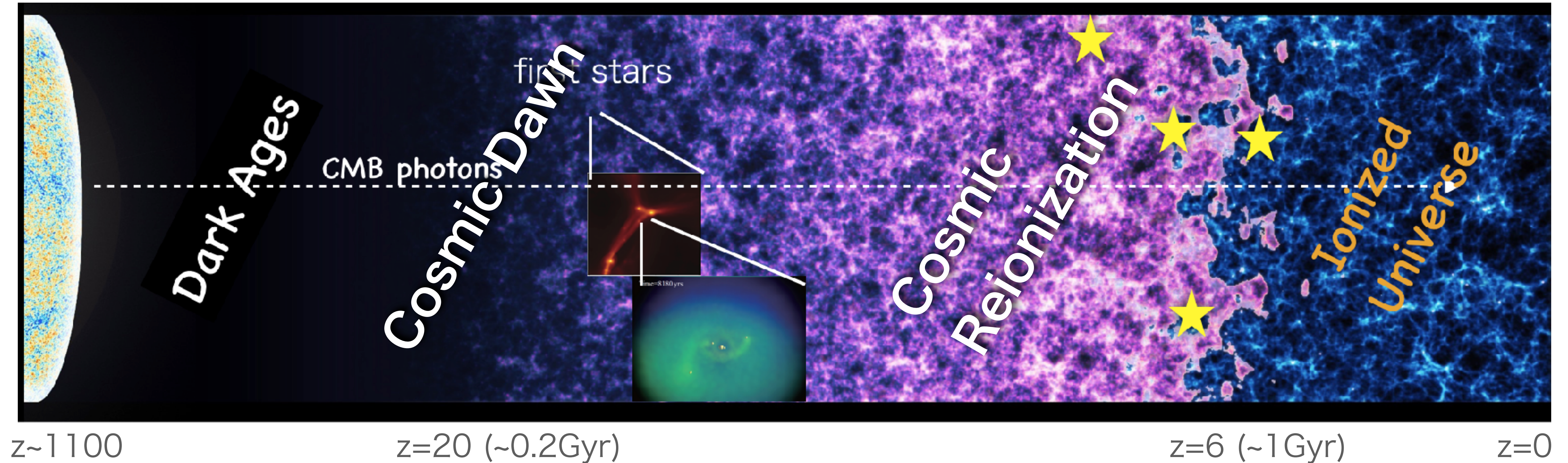


Image credit : K Hasegawa

中性水素ガスで満たされていた暗黒時代

宇宙の夜明け(Cosmic Dawn)と呼ばれる時代, 初代星の誕生とともに水素ガスの冷却-加熱が引き起こされる
(主に)銀河の電離光子によって水素ガスは電離、z=6には宇宙のほぼ全ての場所で電離が完了する

当時のことを探査するために → 中性水素由来の21cm線観測

暗黒時代から宇宙再電離

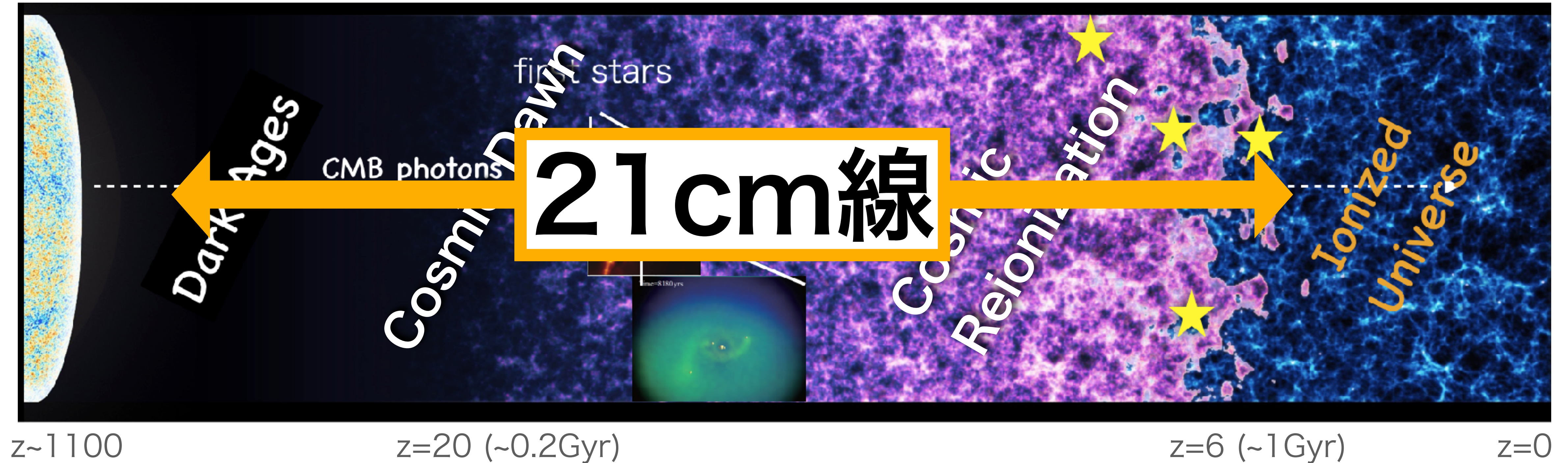


Image credit : K Hasegawa

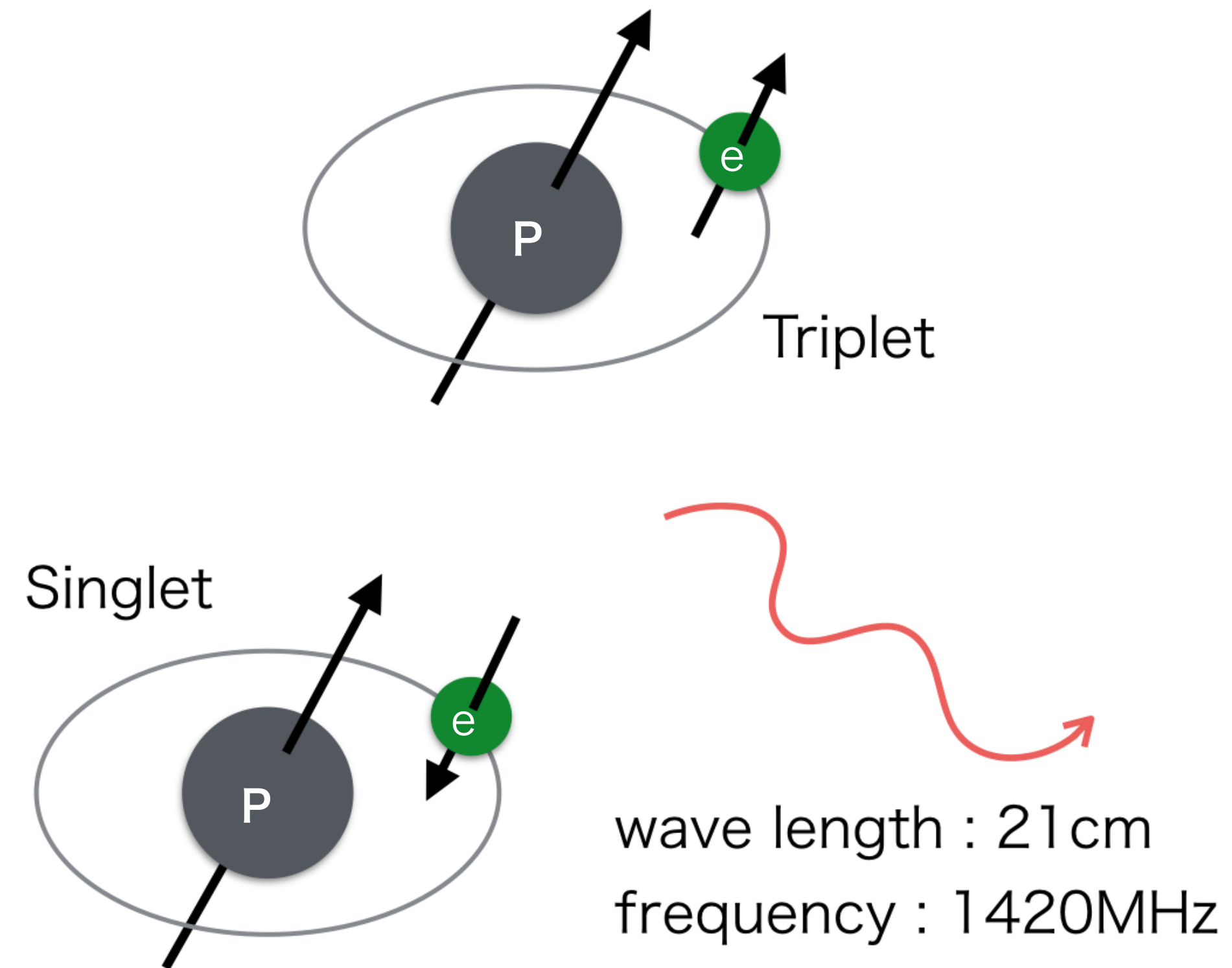
中性水素ガスで満たされていた暗黒時代

宇宙の夜明け(Cosmic Dawn)と呼ばれる時代, 初代星の誕生とともに水素ガスの冷却-加熱が引き起こされる
(主に)銀河の電離光子によって水素ガスは電離、 $z=6$ には宇宙のほぼ全ての場所で電離が完了する

当時のことを探査するために → 中性水素由来の21cm線観測

21cm線

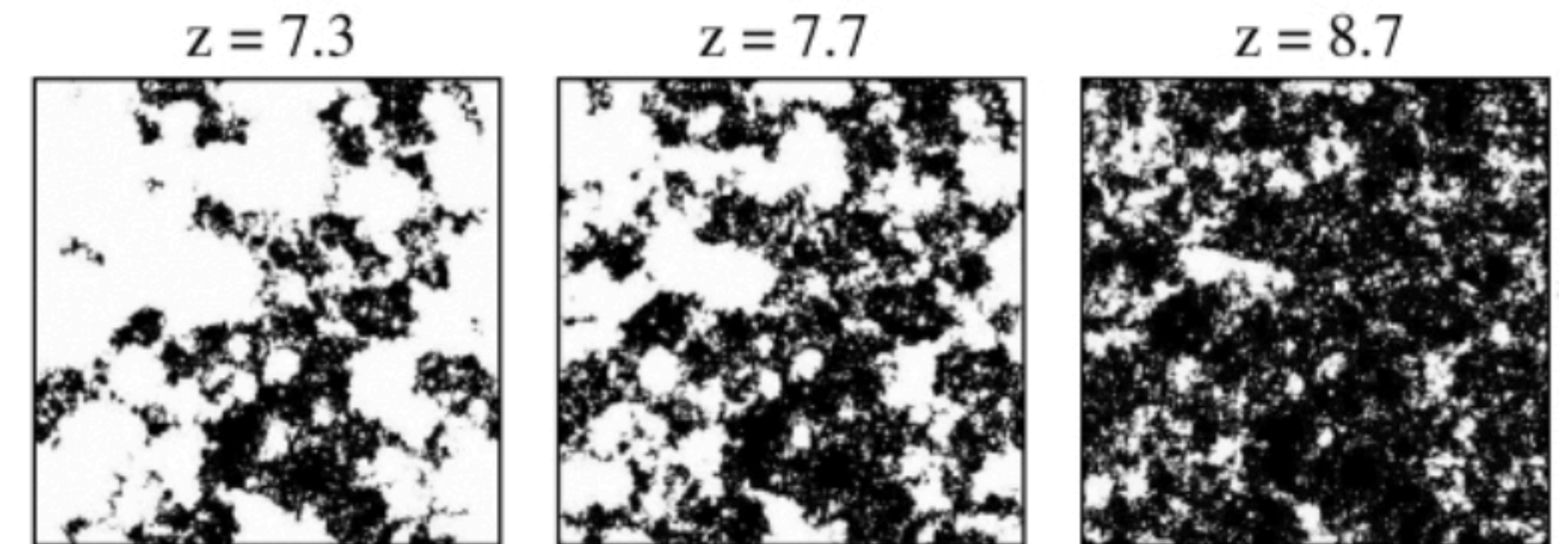
21cm線：中性水素の超微細構造線



21cm線は宇宙膨張により赤方偏移する

- $z=6$, $1420/(1+6) \sim 200$ MHz
- $z=10$, 130 MHz
- $z=20$, 67 MHz

中性なところで明るく、電離したところで暗い



McQuinn et al 2007

さまざまな時代のIGMの様子を明らかにすることができる

21cm線輝度温度

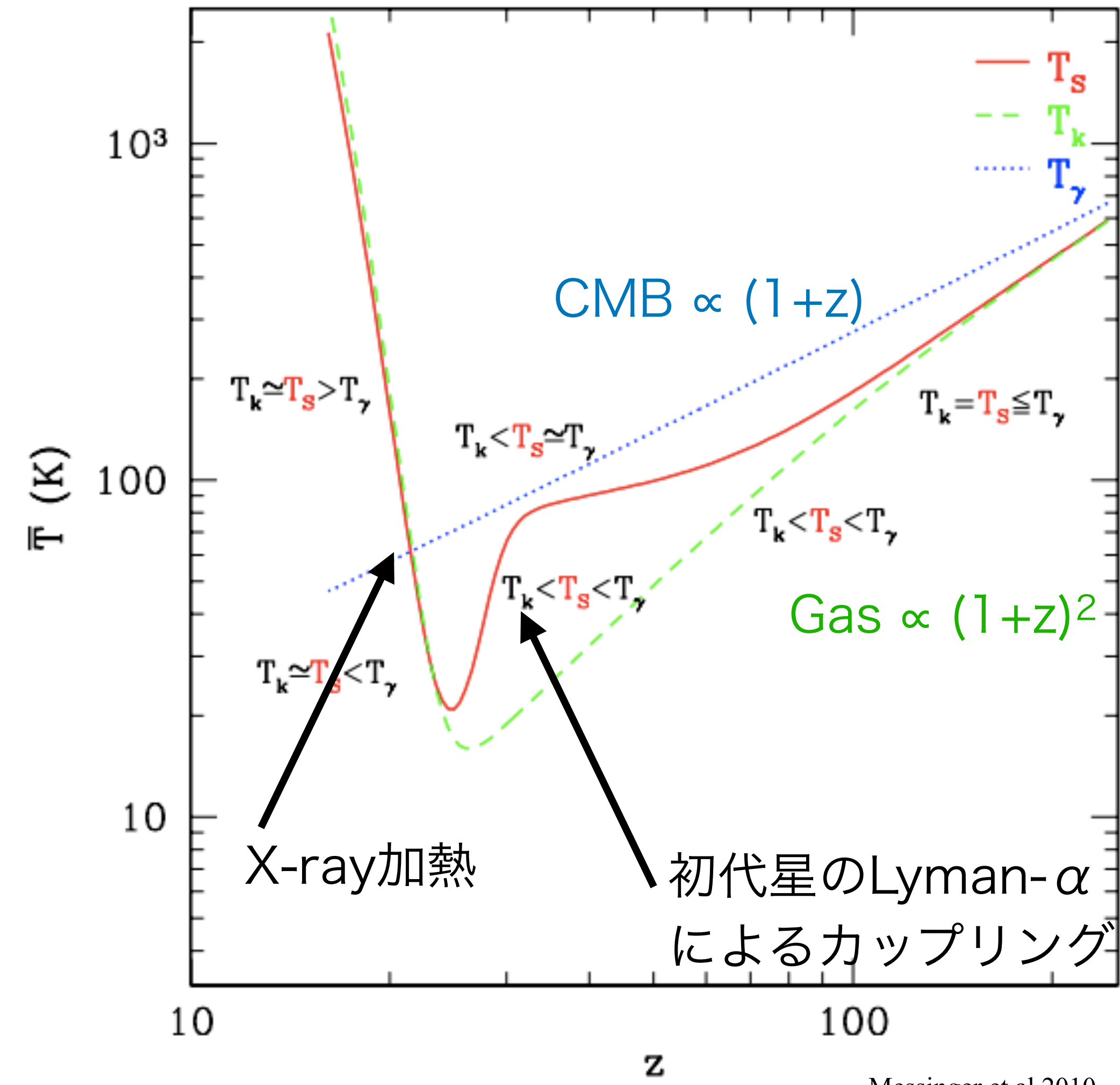
21cm線は背景放射(CMB)に対する水素ガスの放射・吸収として観測

$$\delta T_b \sim \underset{\text{中性率}}{27x_{\text{HI}}} \underset{\text{ガスの揺らぎ}}{(1 + \delta_b)} \underset{\text{スピン温度}}{\left(1 - \frac{T_\gamma(z)}{T_S}\right)} \left(\frac{1+z}{10} \frac{0.15}{\Omega_m h^2}\right)^{1/2} \left(\frac{\Omega_b h^2}{0.023}\right) \text{mK}$$

スピン温度(中性水素原子の励起温度)がCMB温度よりも低い時は吸収線、高い時は輝線として観測される

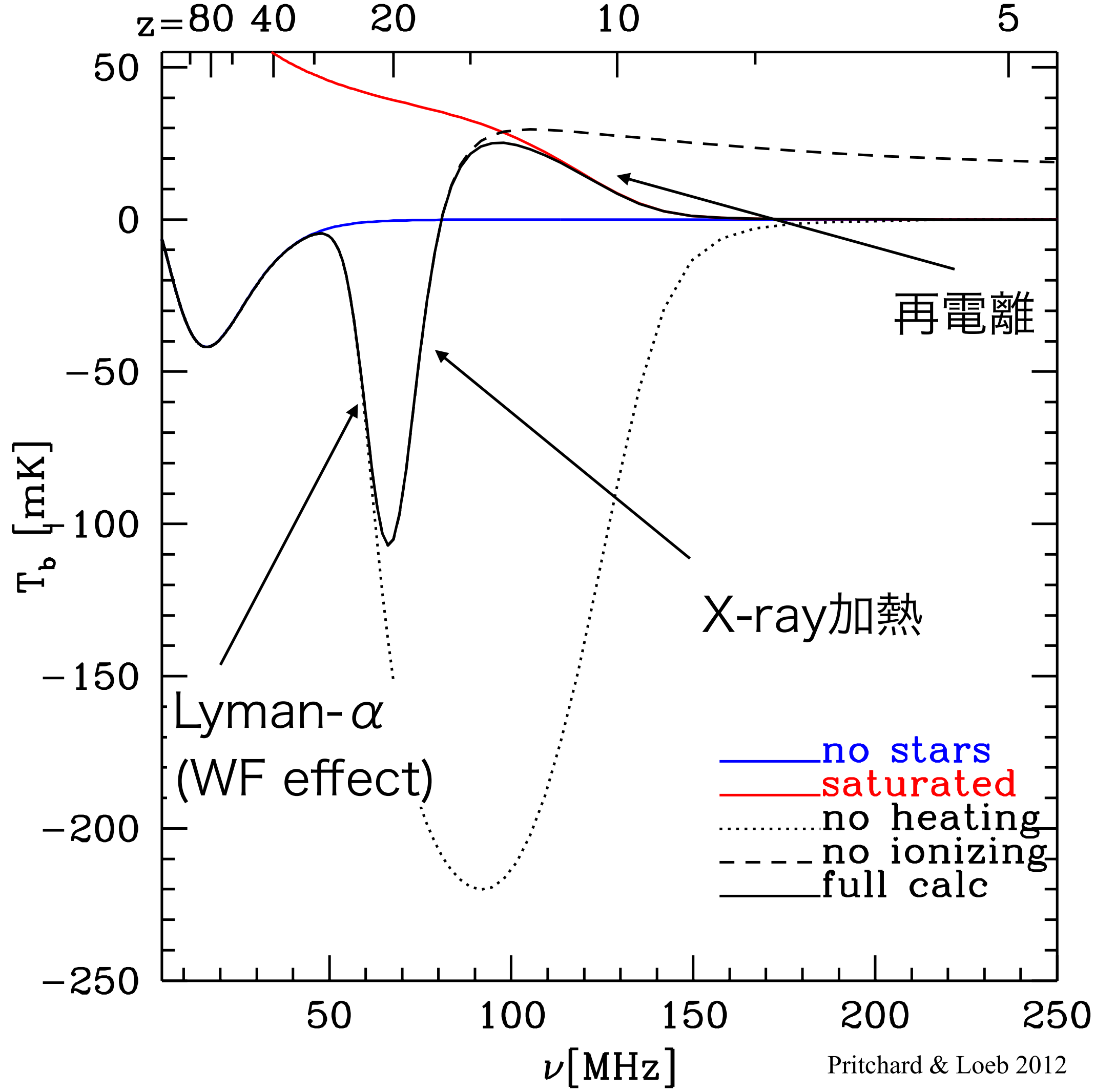
スピン温度 & 21cmグローバルシグナル

スピン温度の進化



Messinger et al 2010

21cm線のグローバルな進化

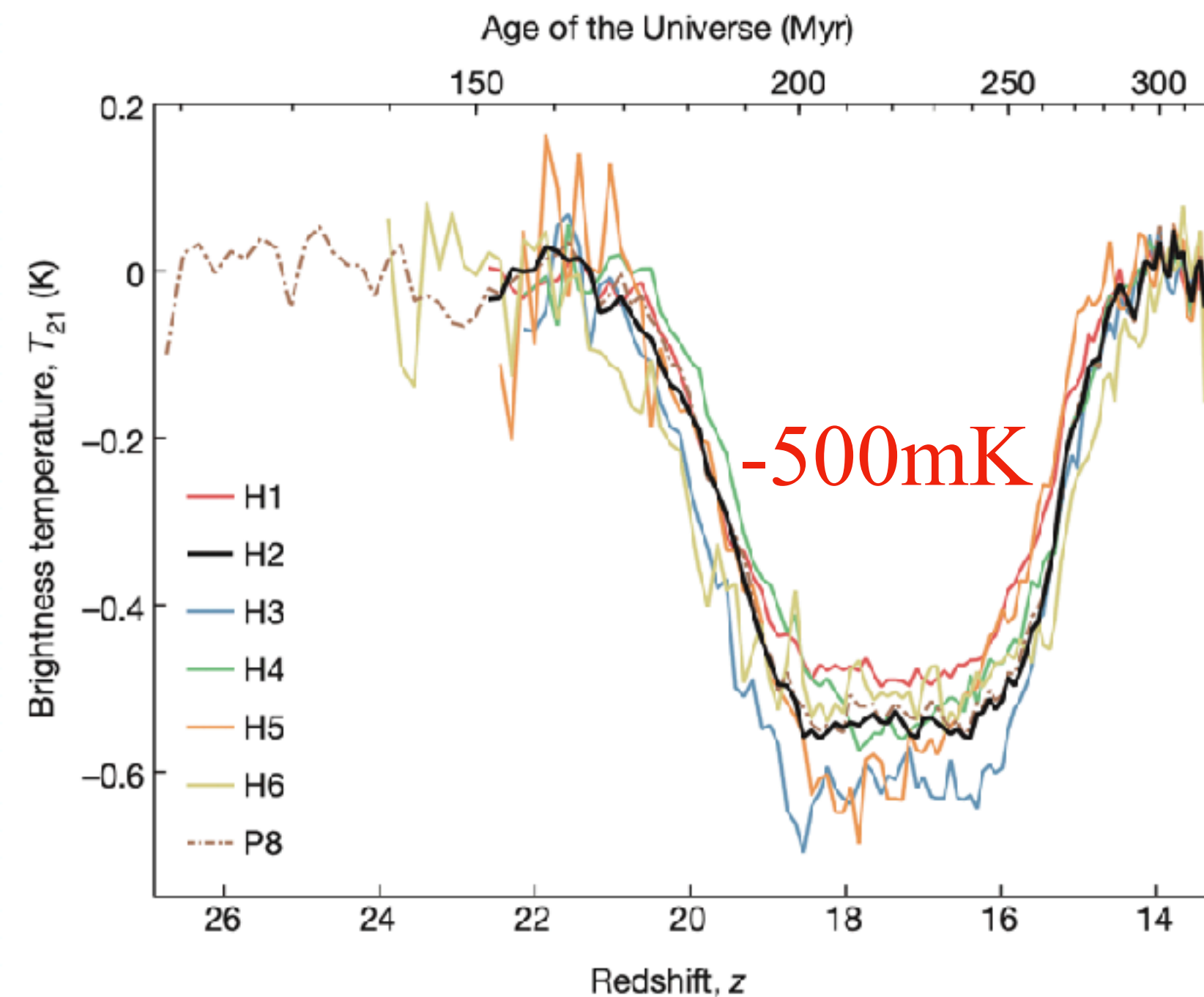


Pritchard & Loeb 2012

21cm線グローバルシグナルの観測

2018年にEDGES(Bowman+2018)によって
報告された非常に強い吸収線 (-500mK, $z=17.8$)

EDGESの結果は普通のモデルでは説明できない



$$\delta T_b \propto \left(1 - \frac{T_\gamma(z)}{T_S} \right)$$

エキゾチックな物理を要請

(例)

- ・ バリオン-ダークマター相互作用

→ T_S を下げる

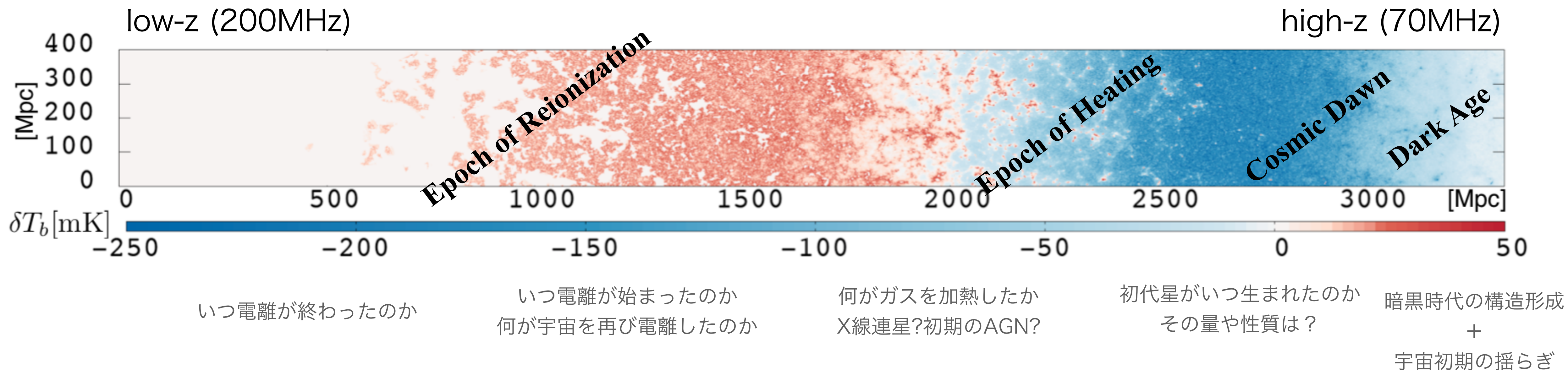
- ・ CMB以外の電波背景放射

→ T_r を上げる

装置由来の誤差が指摘されるなど議論は未だ続いている(e.g. Hill+2018)

21cm線輝度温度

理想的には3次元で観測できる(天球面+周波数) 例として, 21cmFASTによるシミュレーション



21cm線パワースペクトル

揺らぎの統計量としてパワースペクトルによる解析が主流

観測される輝度温度を3次元フーリエ変換（天球面方向 + 視線方向(=周波数)）

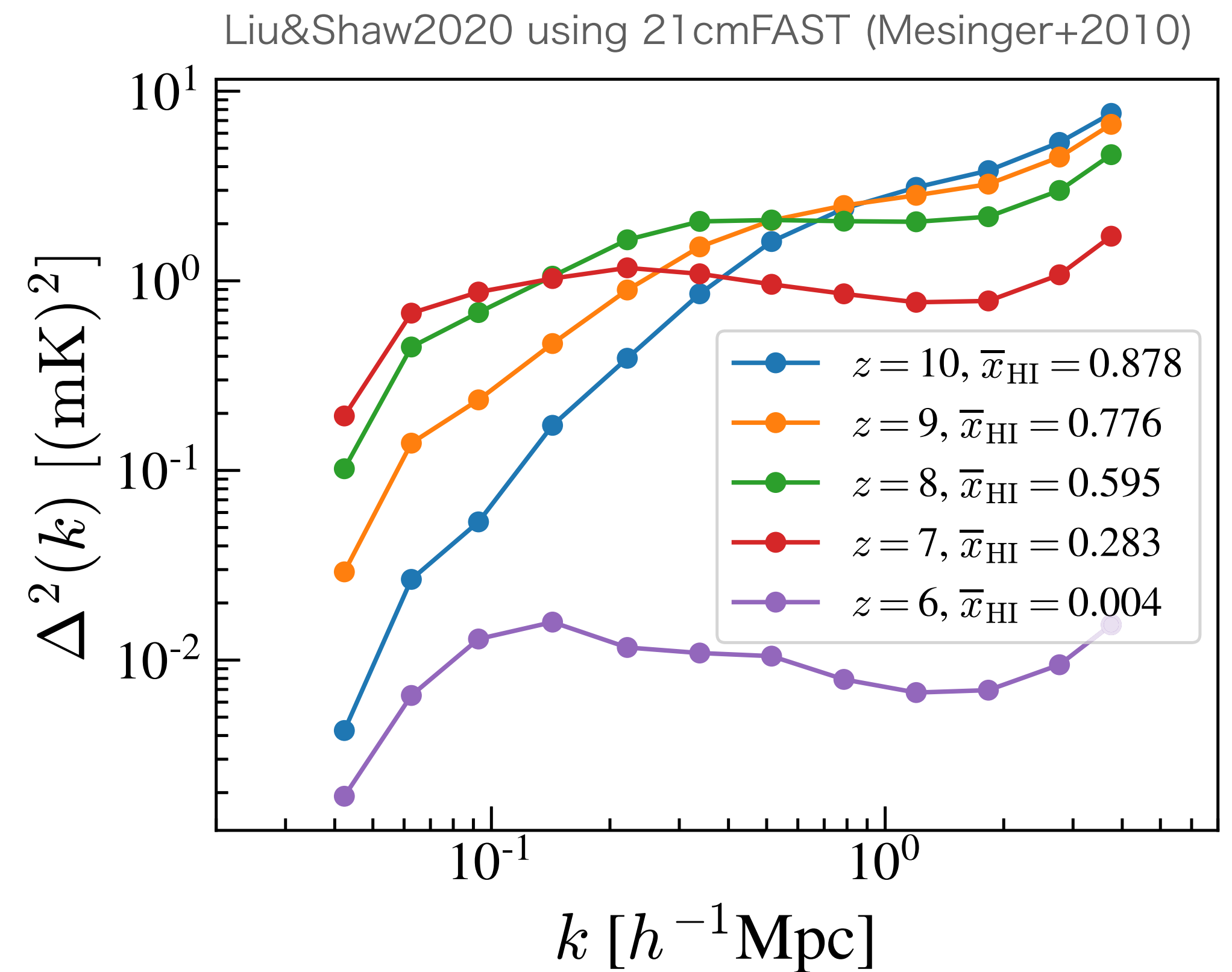
$$\delta\tilde{T}_b(\mathbf{k}) = \frac{1}{(2\pi)^3} \int \delta T_b(\mathbf{x}) \exp(-i\mathbf{k} \cdot \mathbf{x}) d\mathbf{x}$$

パワースペクトルの定義

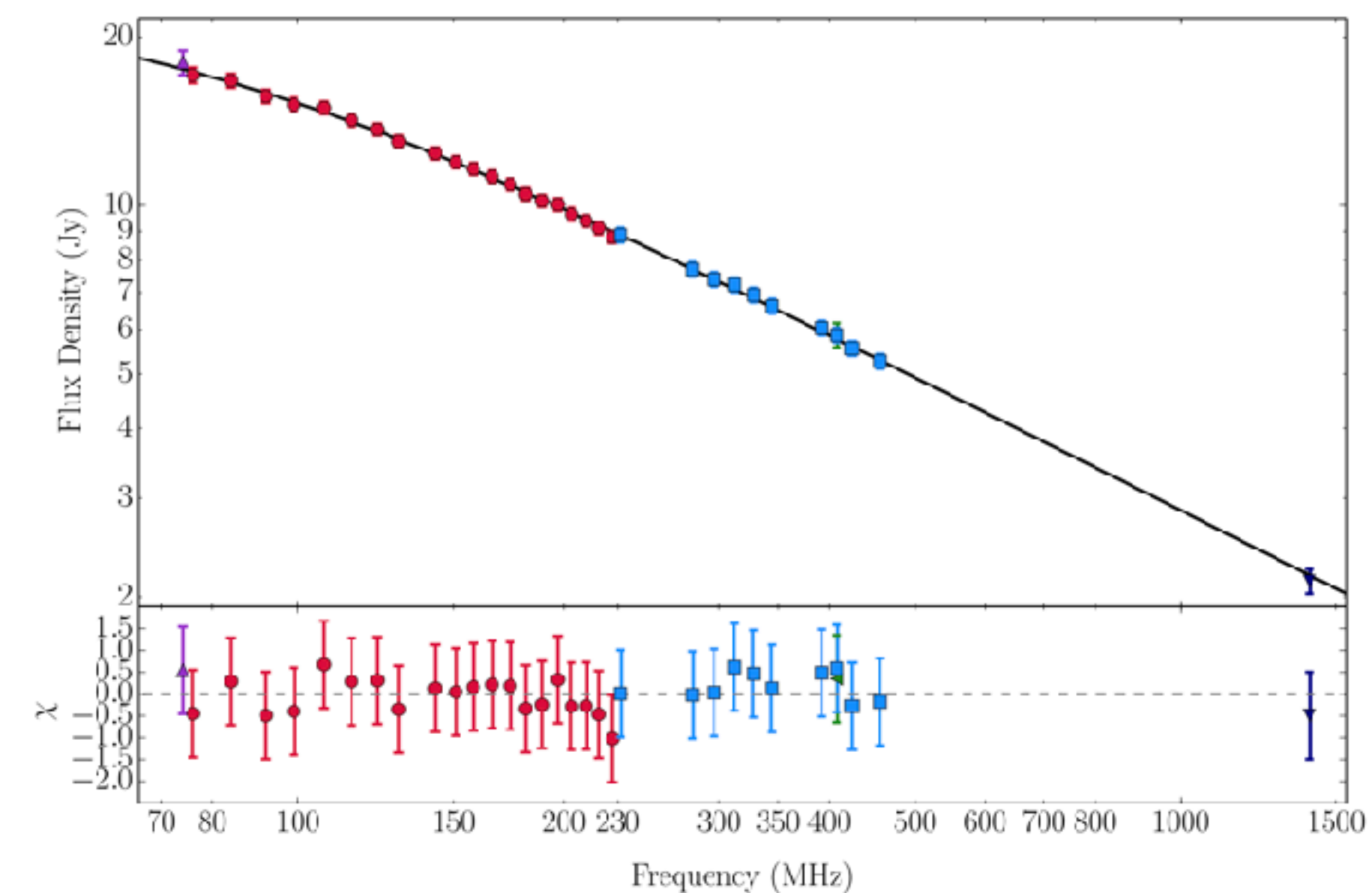
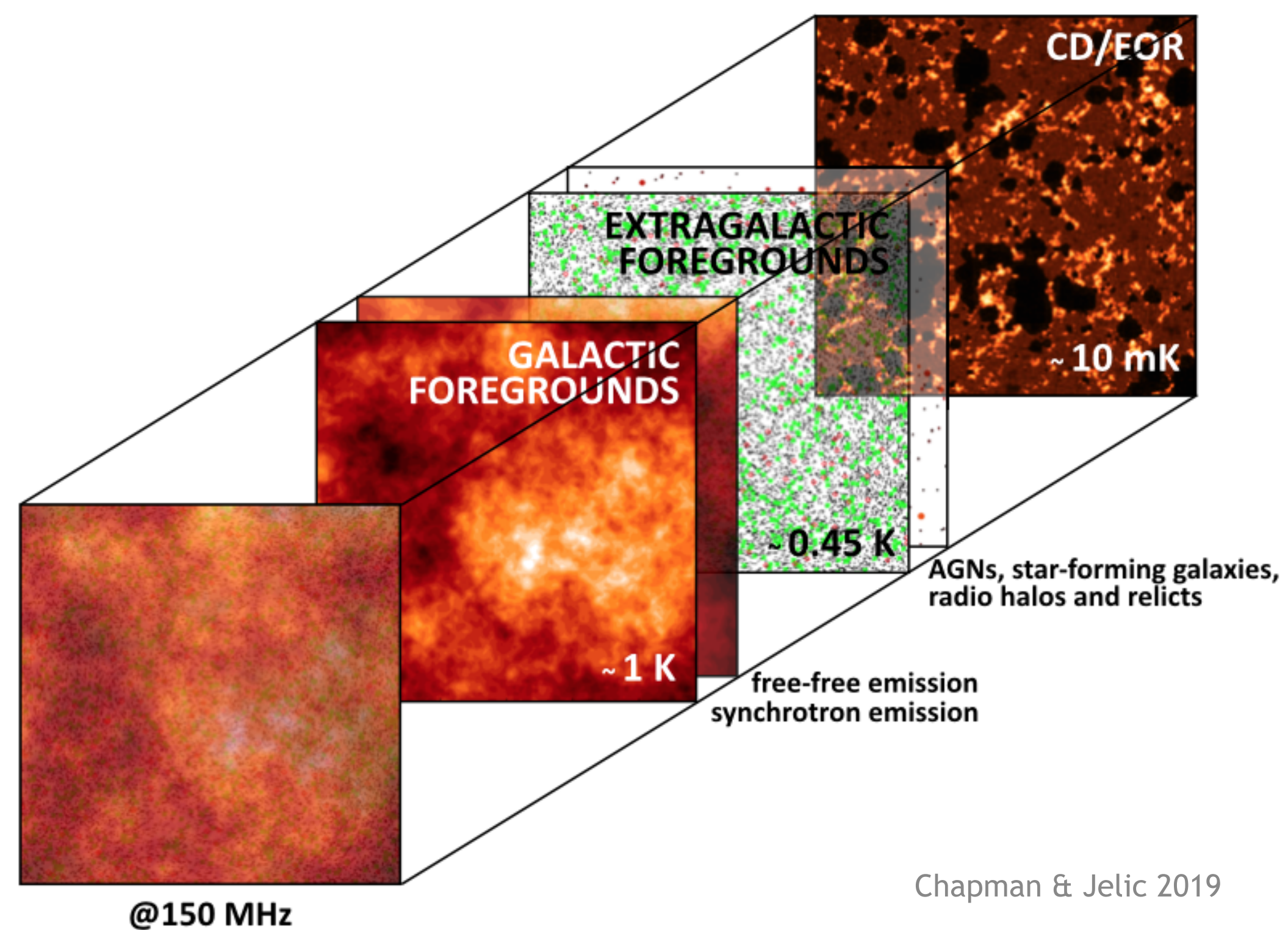
$$\langle \delta\tilde{T}_b(\mathbf{k}_1) \delta\tilde{T}_b(\mathbf{k}_2) \rangle \equiv (2\pi)^3 \delta_D(\mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2) P_{21}(\mathbf{k}_1)$$

モデル次第で波数 k , 赤方偏移 z ごとにさまざまに変化(右図)

ただしパワースペクトルは未検出...



前景放射



電波天体のスペクトル例
PKSB0310-150 (Hurley-Walker+2016)

21cm線の検出を妨げているのは、銀河系や系外銀河由来の前景放射(シンクロトロン放射が主)

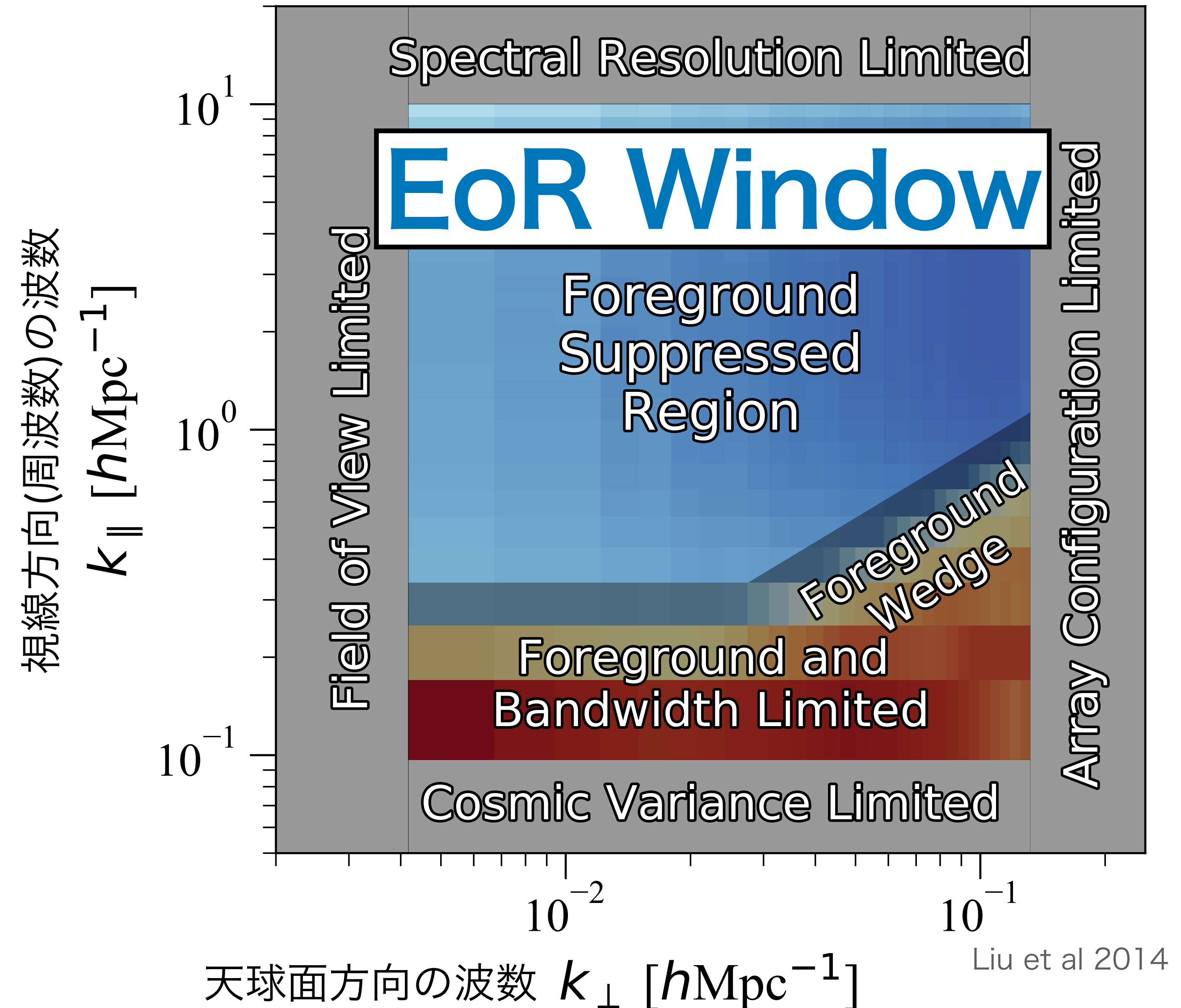
21cm線よりも**3~4桁大きな揺らぎを持っている**

前景放射は非常に**滑らかなスペクトル**を持っている

2次元パワースペクトル & EoR window

前景放射が滑らかなスペクトルを持っている。
その特性を利用して前景放射のパワーを下げる。

この戦略を使いつつ、さまざまな望遠鏡が
21cm線の検出に向けて観測を行なっている



これまでの21cm線観測

再電離以前の21cm線パワースペクトルを観測するために
さまざまな低周波電波望遠鏡が観測を進めているが、未検出

MWA



Credit : Natasha Hurley-Walker

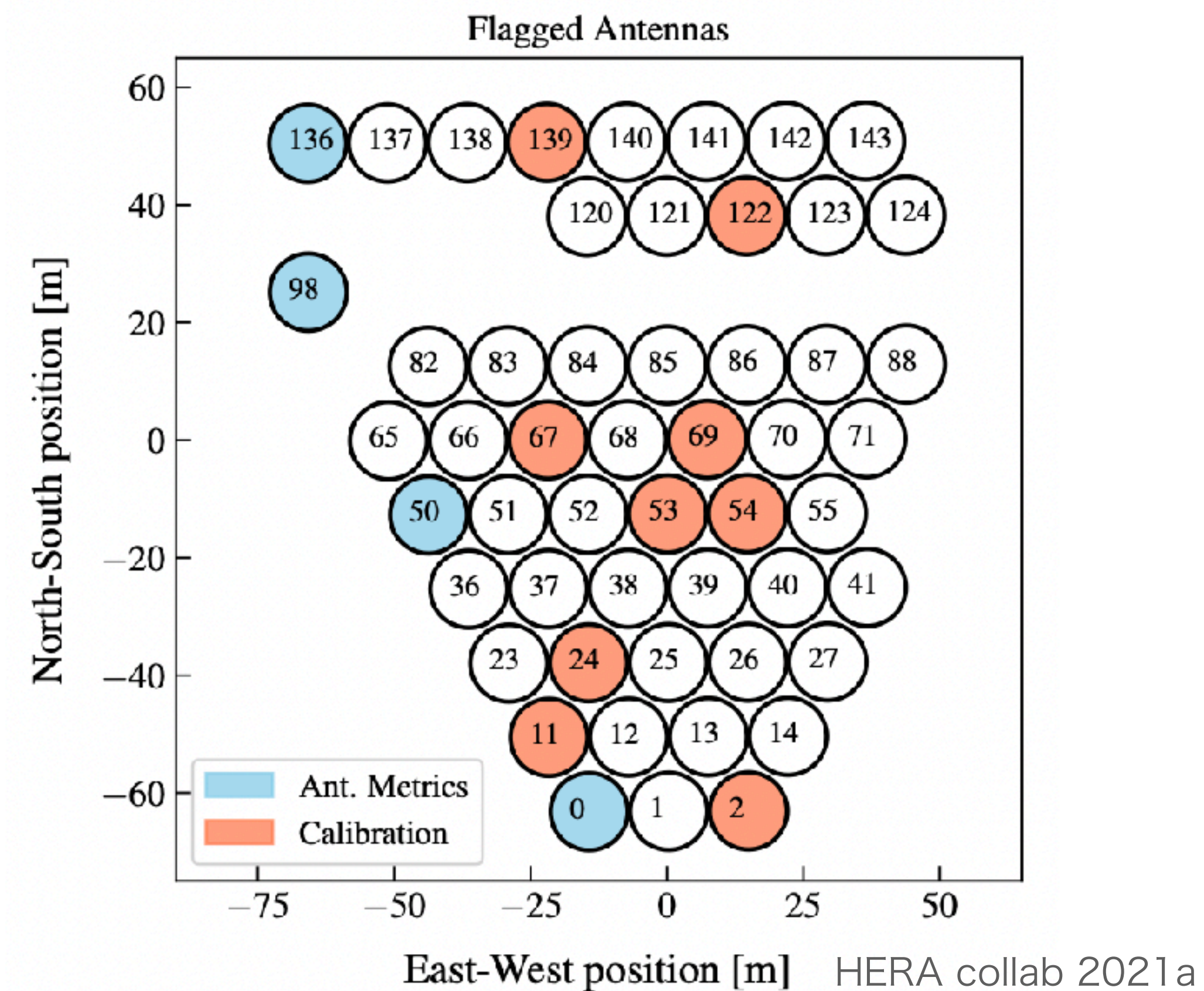
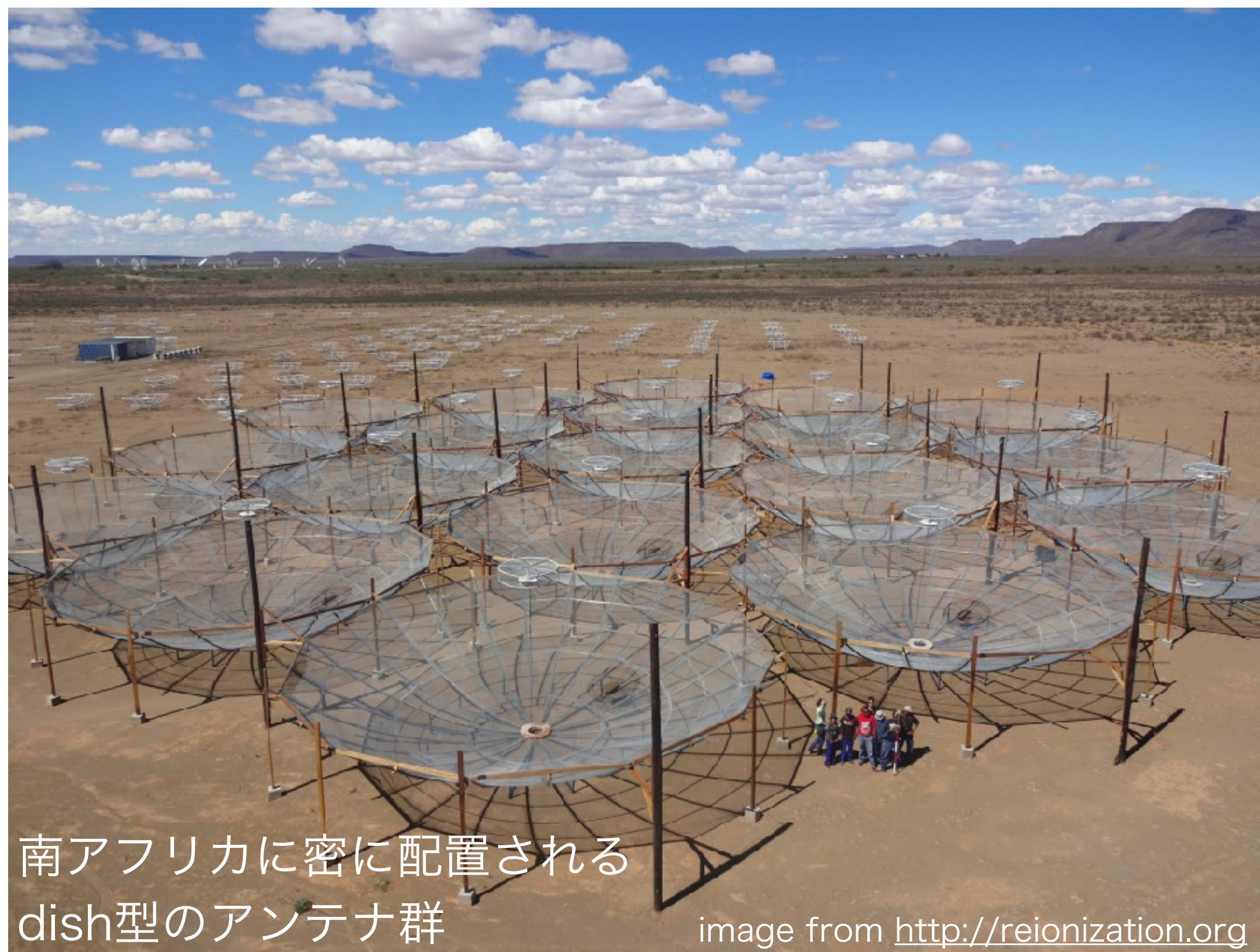
LOFAR



Credit : LOFAR/Astron

他にも PAPER, GMRT, LWAなど

最近始まった：HERA



最終的には350台

10%の装置で最新の結果が報告された



将来 : SKA1 Low

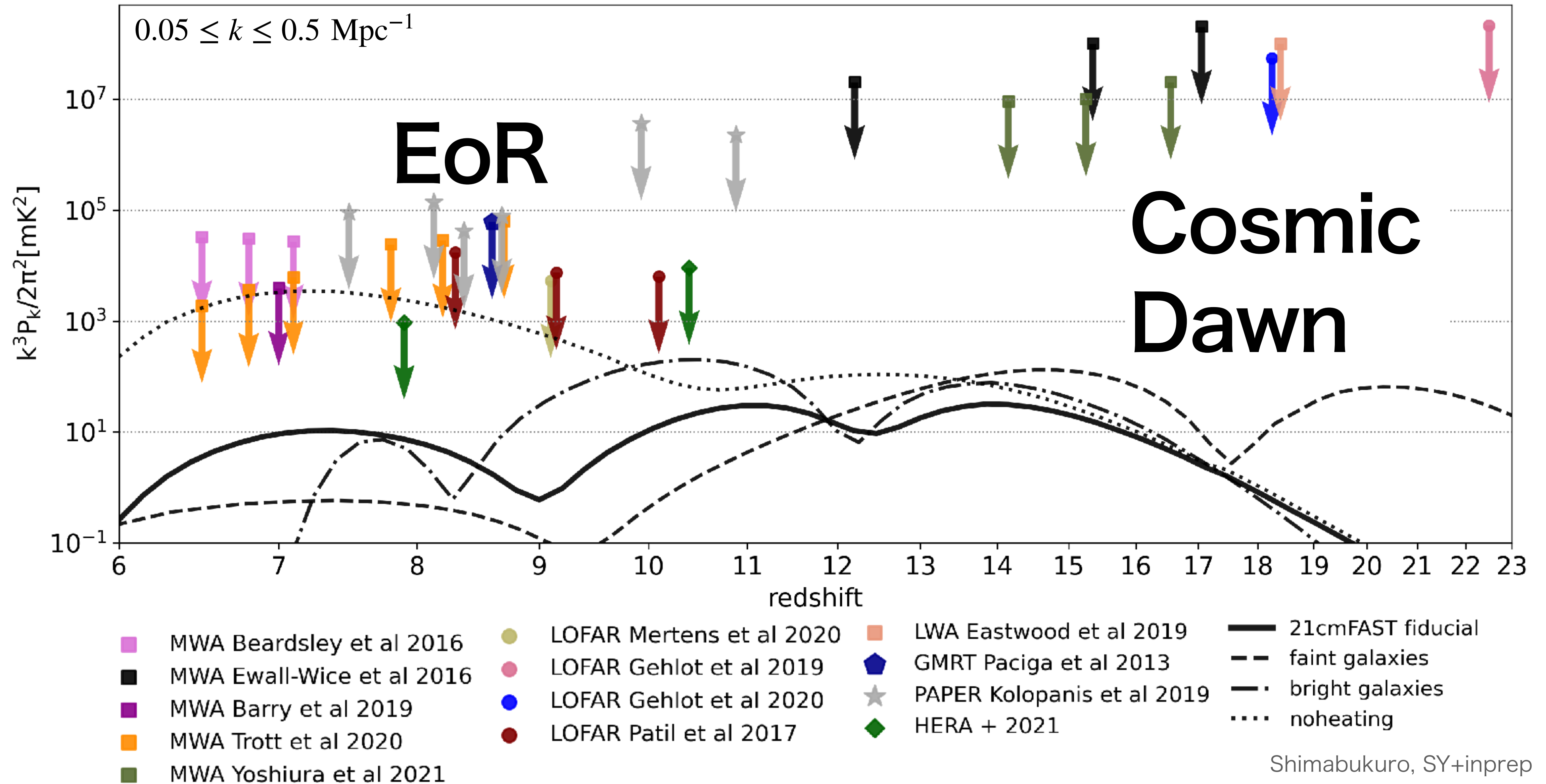
SKA-Low Prototype

256のアンテナで構成されたタイルを512台 = 13万台のアンテナ群 @ 豪州

単純な感度はMWA, LOFAR, (full)HERAの120, 12, 8倍
今年から建設が始まった

Credit: Michael Goh and ICRAR/Curtin.

パワースペクトル観測の現状 (主にこの5年)



21 cm線観測の困難

系統誤差要因の例

人口電波(RFI)

電離層

装置

アンテナビーム

前景放射フィルタ

前景放射除去

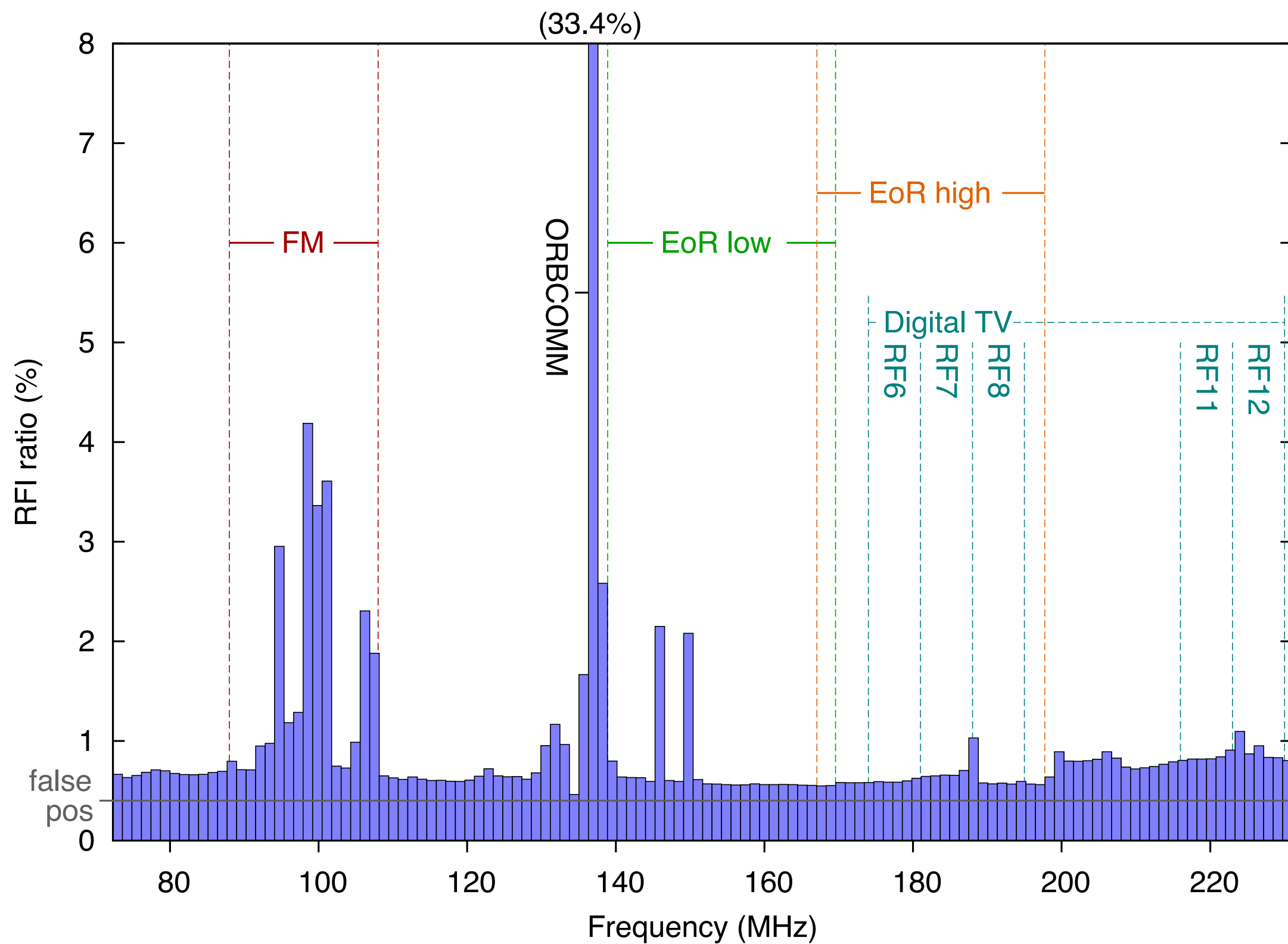
電波天体モデル

など

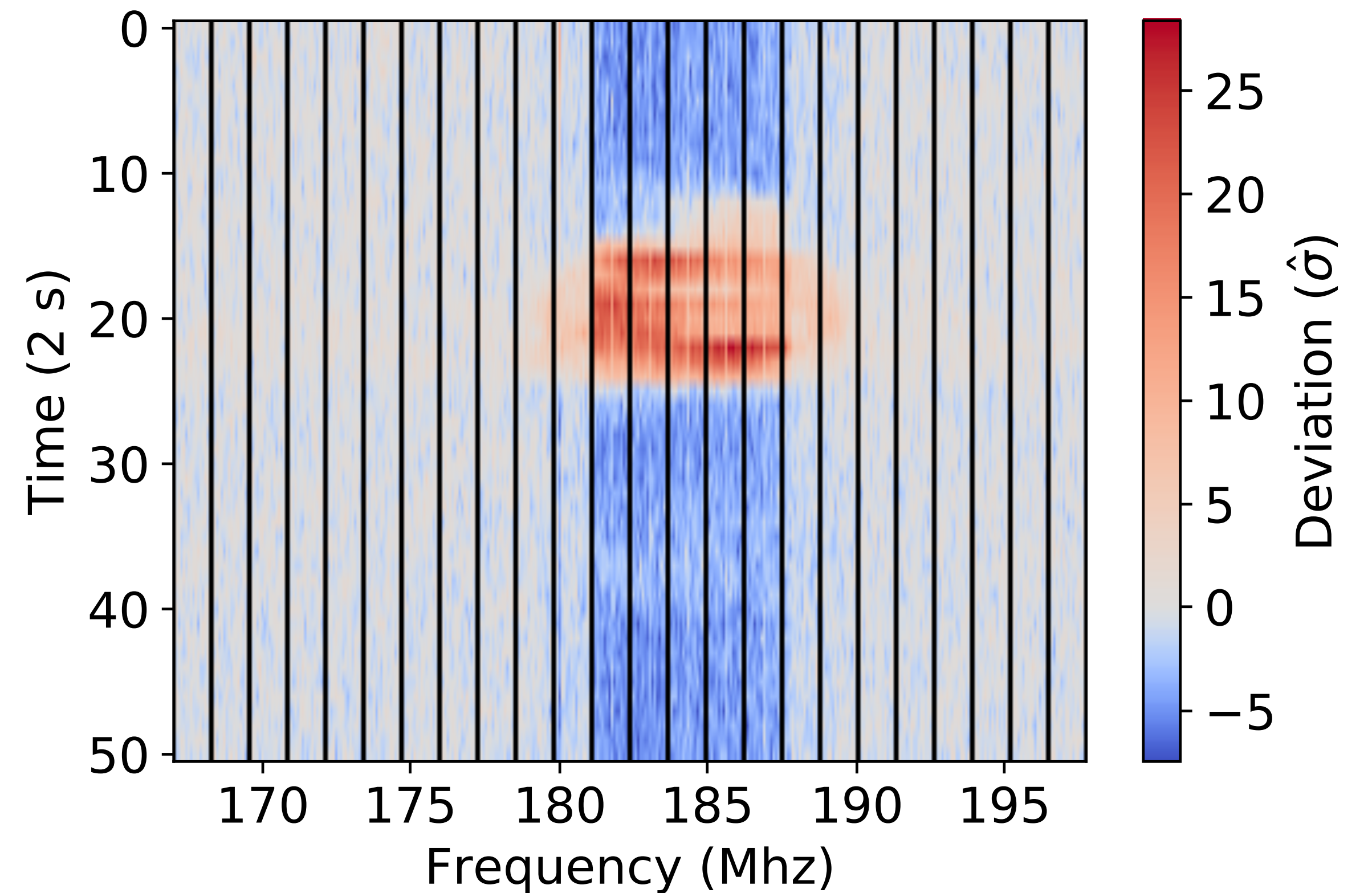
以下、いくつかの問題点について最近の進展を簡単に紹介

これから若干マニアックな話が続きます

Radio Frequency Interference (RFI)



SKA1 LowやMWAの建設される
Murchison Radio Observatory(MRO)は
RFI的に非常にCleanで数%程度の汚染
(Offringa+2015)



SSINS (Wilensky et al 2019)
全基線を足し上げて感度を上げ暗いRFIを検出
暗いRFIもパワースペクトル観測に影響する
(Wilensky et al 2020, 2021)

電離層

電離層は低周波電波観測の主要系統誤差 (位相に誤差。見かけの位置のずれ)

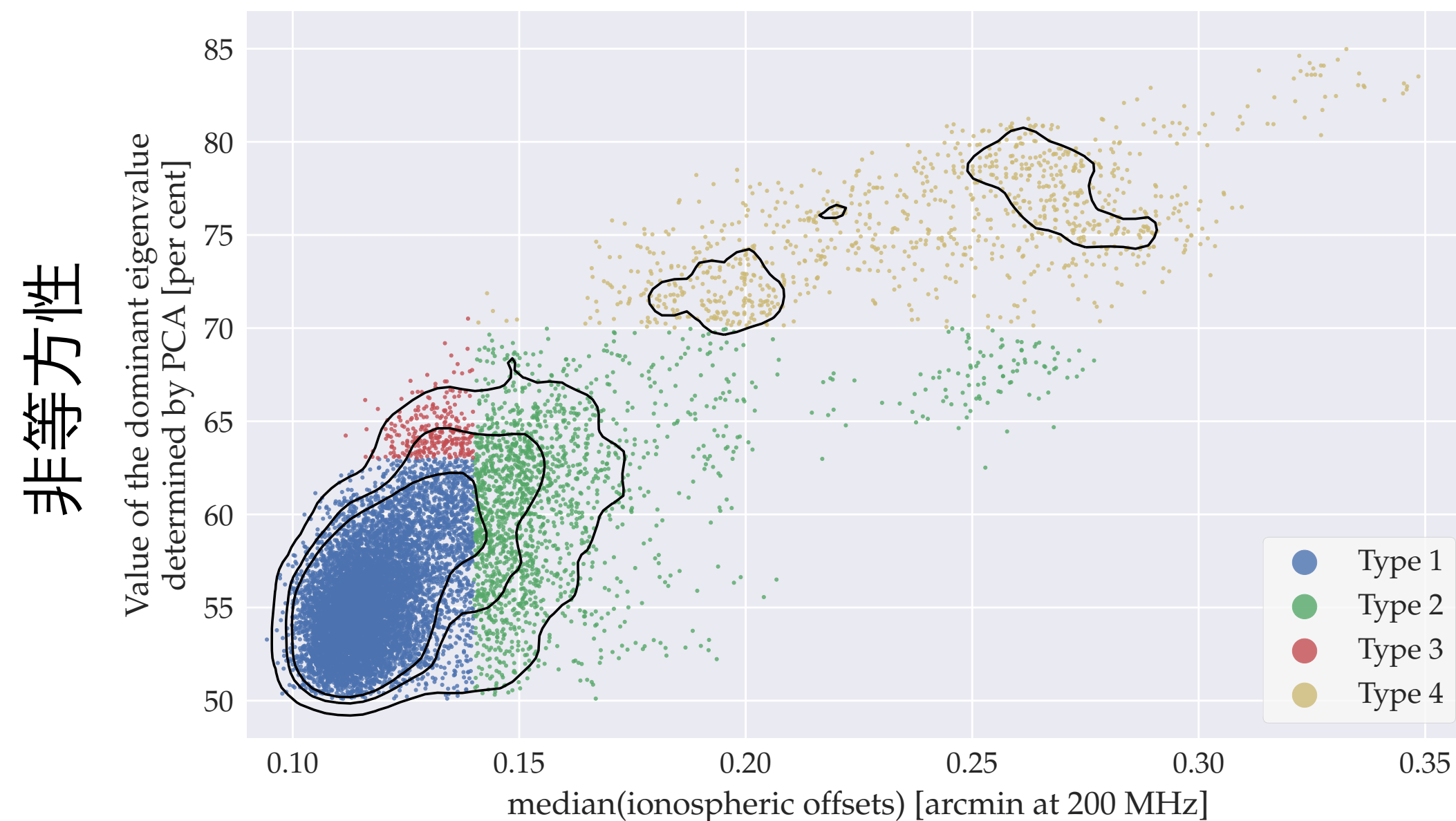
補正はDirection Dependent Calibration(DDCal)が必要 (e.g. Peeling : Intema+2009)

(左)電離層の活動性の分類(Jordan et al 2017)

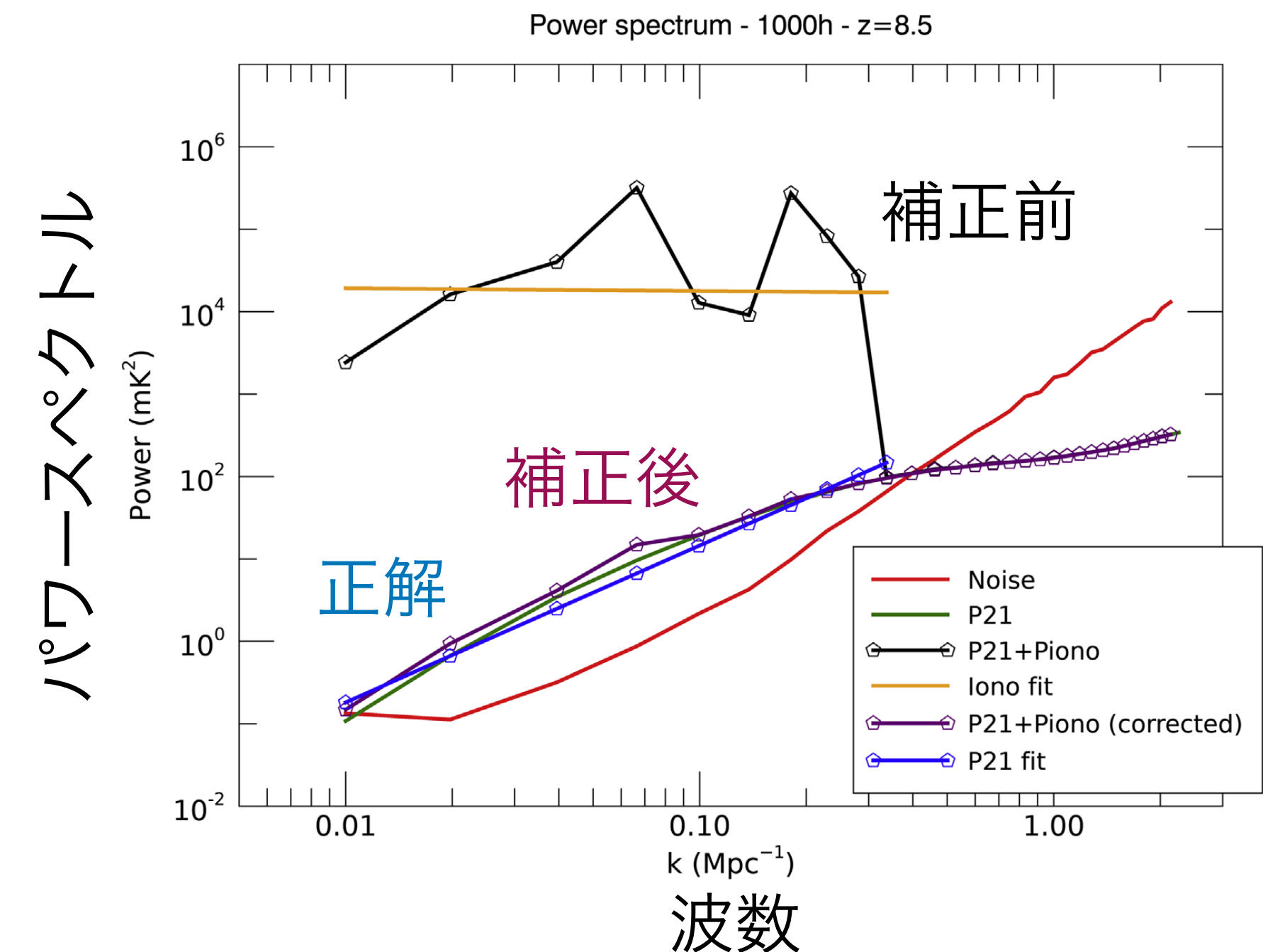
(右)DDCalによる補正の精度を解析的, 数値的に確認 (Trott+2018, Chege+2021)

既存の手法(Peeling)+活動性の分類をすればパワースペクトルへの影響は少ない?

超低周波では追加の補正が必要かもしれない (SY+2021)



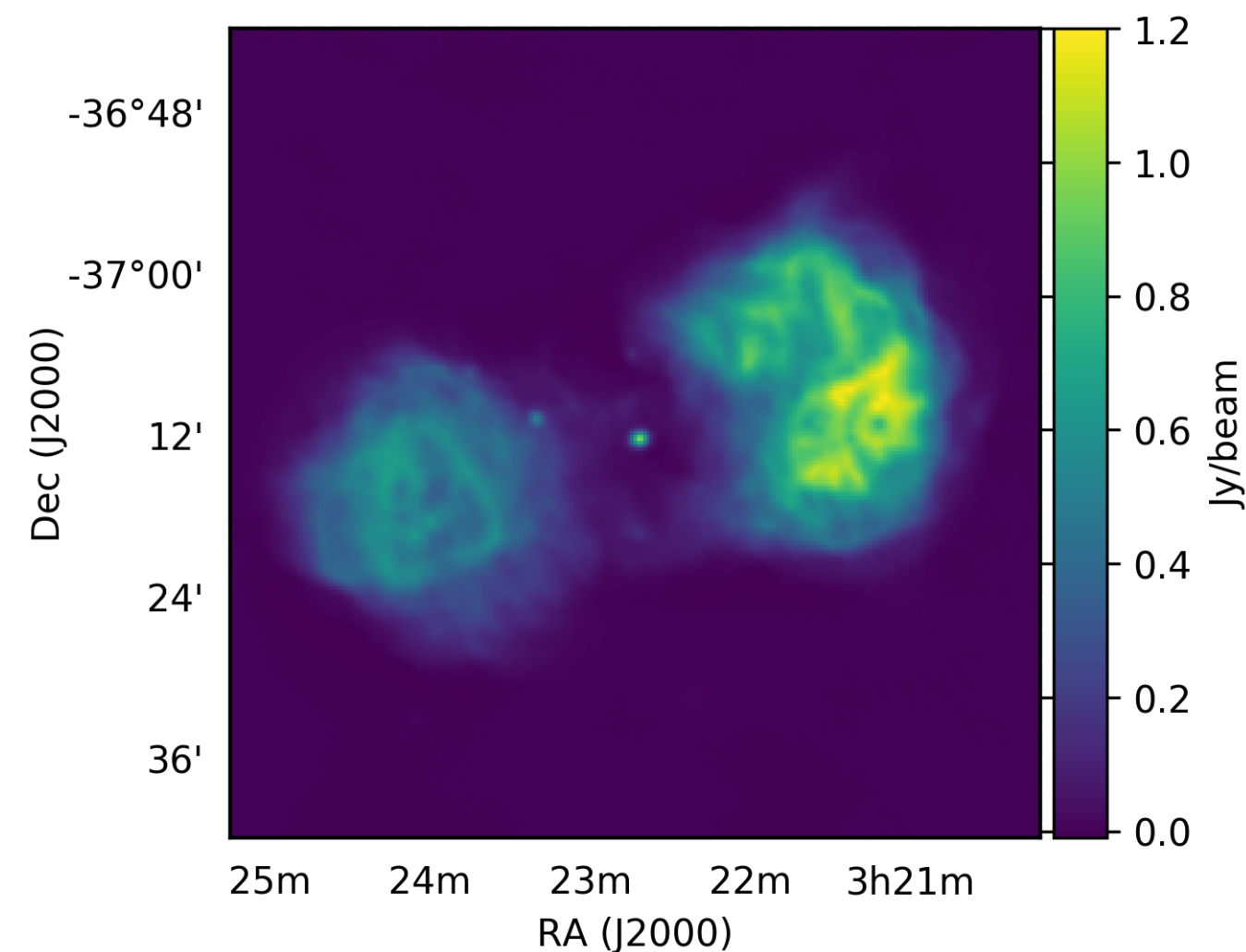
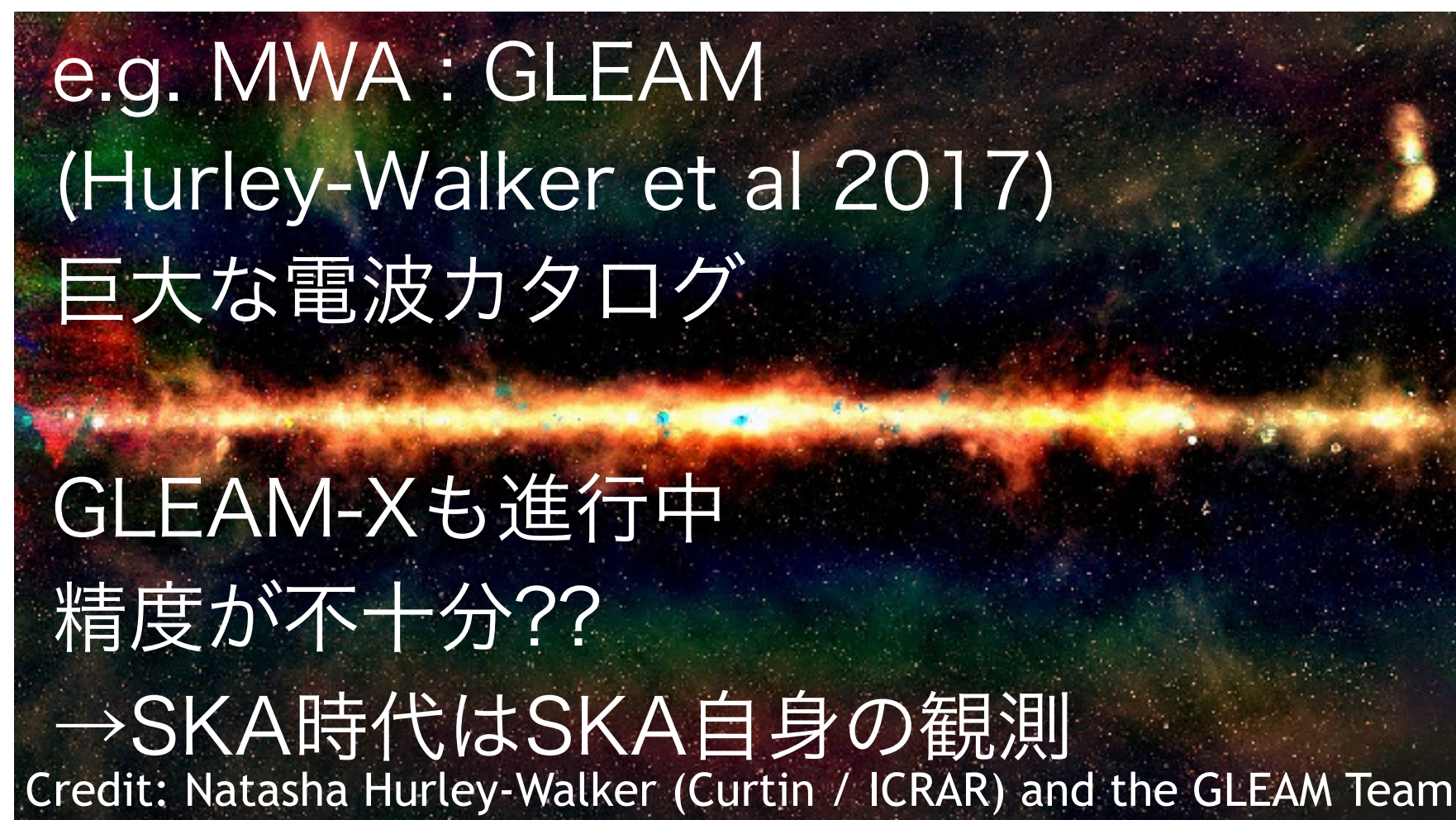
電離層によるズレの強度



前景放射モデリング

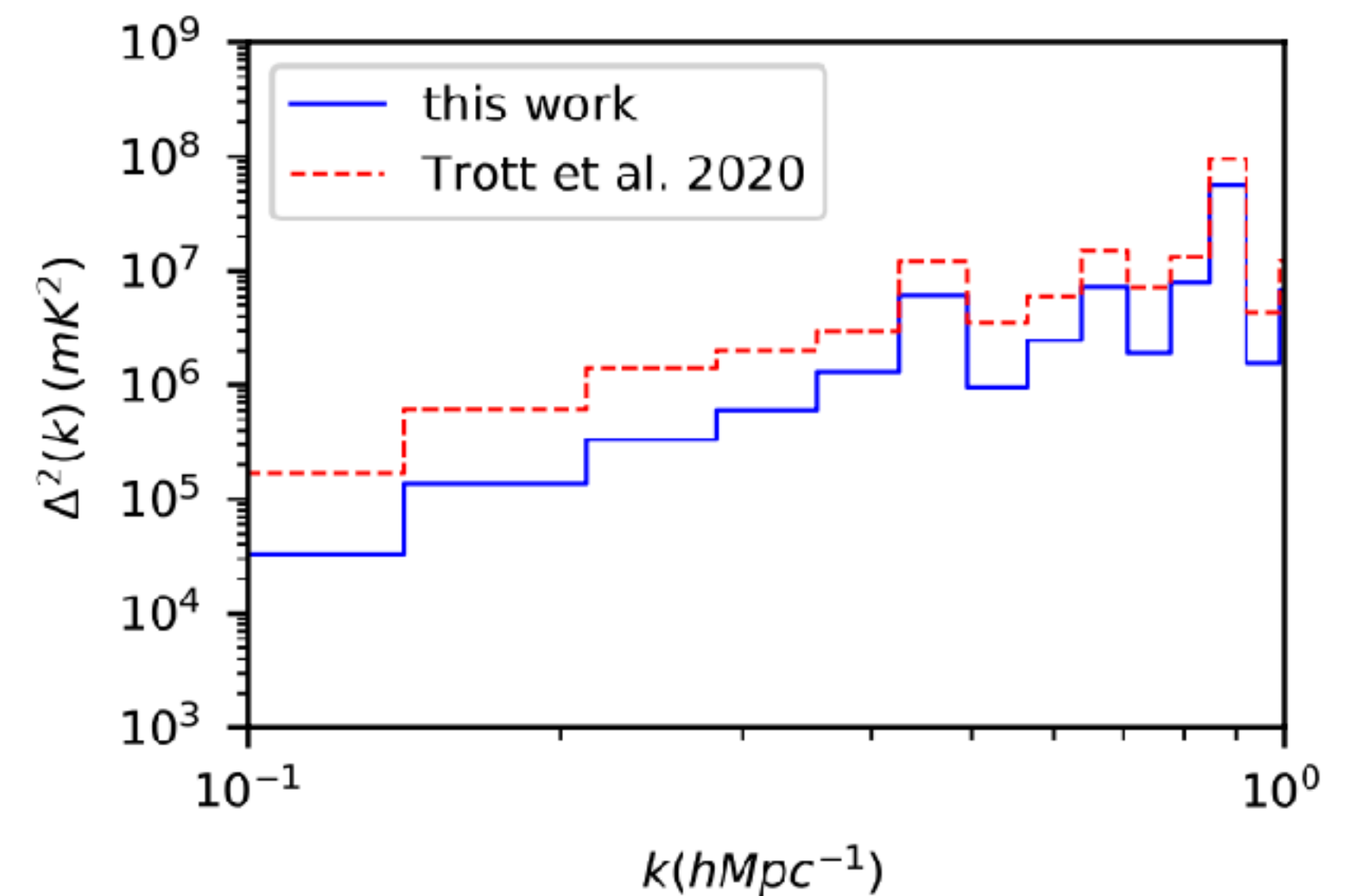
電波天体(=前景放射)のモデルはキャリブレーションに必須

不完全なカタログは深刻な系統誤差を生み、21cm線検出をできなくする(e.g. Barry+2016)



広がった天体のモデル化が必要

Shape-let modelling for FornaxA
(SHAMFI : Line et al 2020)



Shape-let modelを使った解析で
EoR1領域でのパワースペクトルを更新
Rahimi+2021
(EoR1 : Fornax AのあるMWA主要領域)

前景放射除去

さまざまな方法が開発されてきた

Polynomial fitting

FastICA (Chapman et al. 2012)

GMCA (Chapman et al. 2013)

GPR (Mertens et al. 2018)

最近開発が進むのが

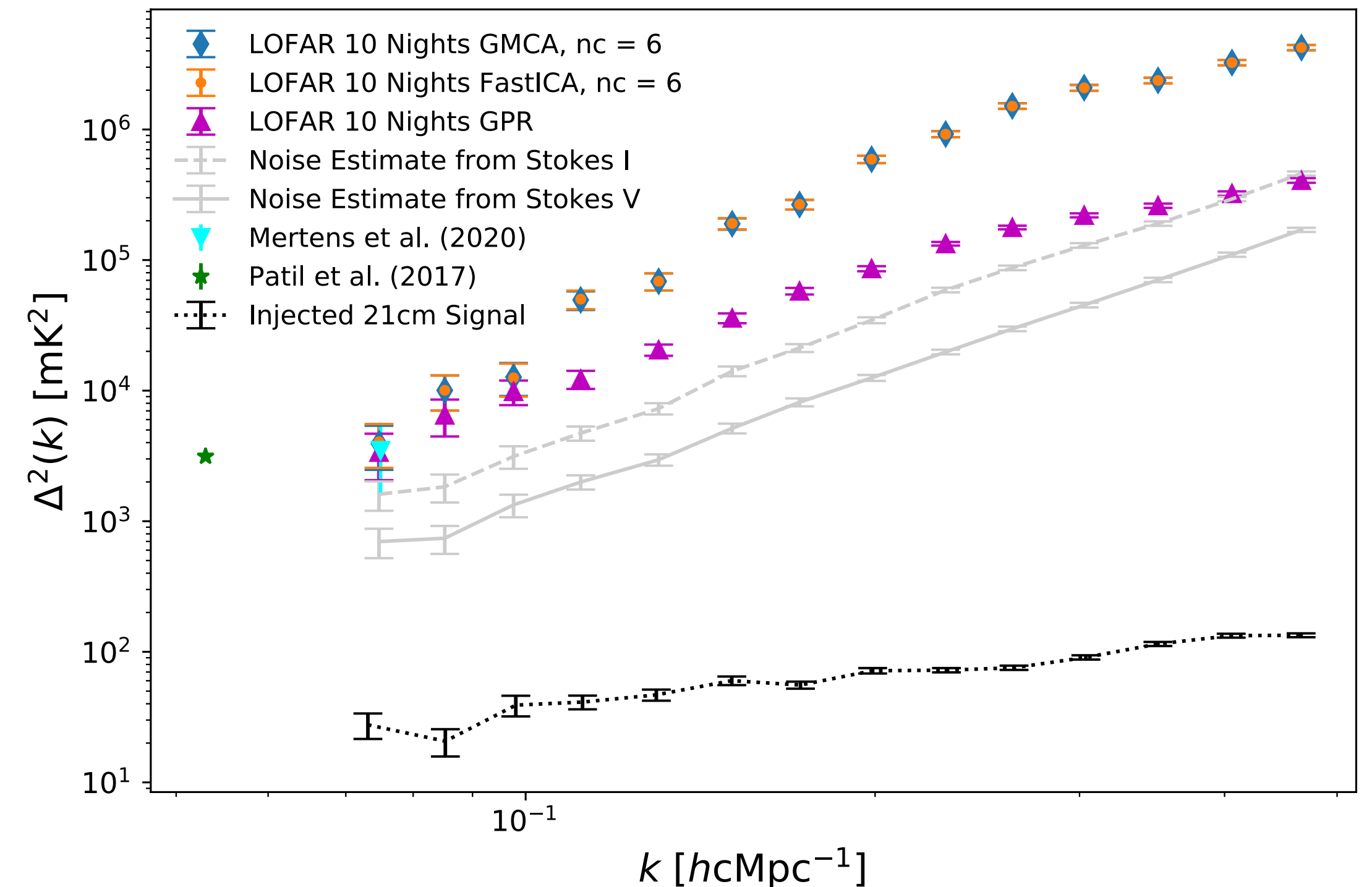
Gaussian Process Regression

前景放射の共分散を仮定し、データから予測

LOFARの最新の結果で実際に活用済み
(Mertens+2020)

HERAへの活用も議論されている
(Ghosh+2020)

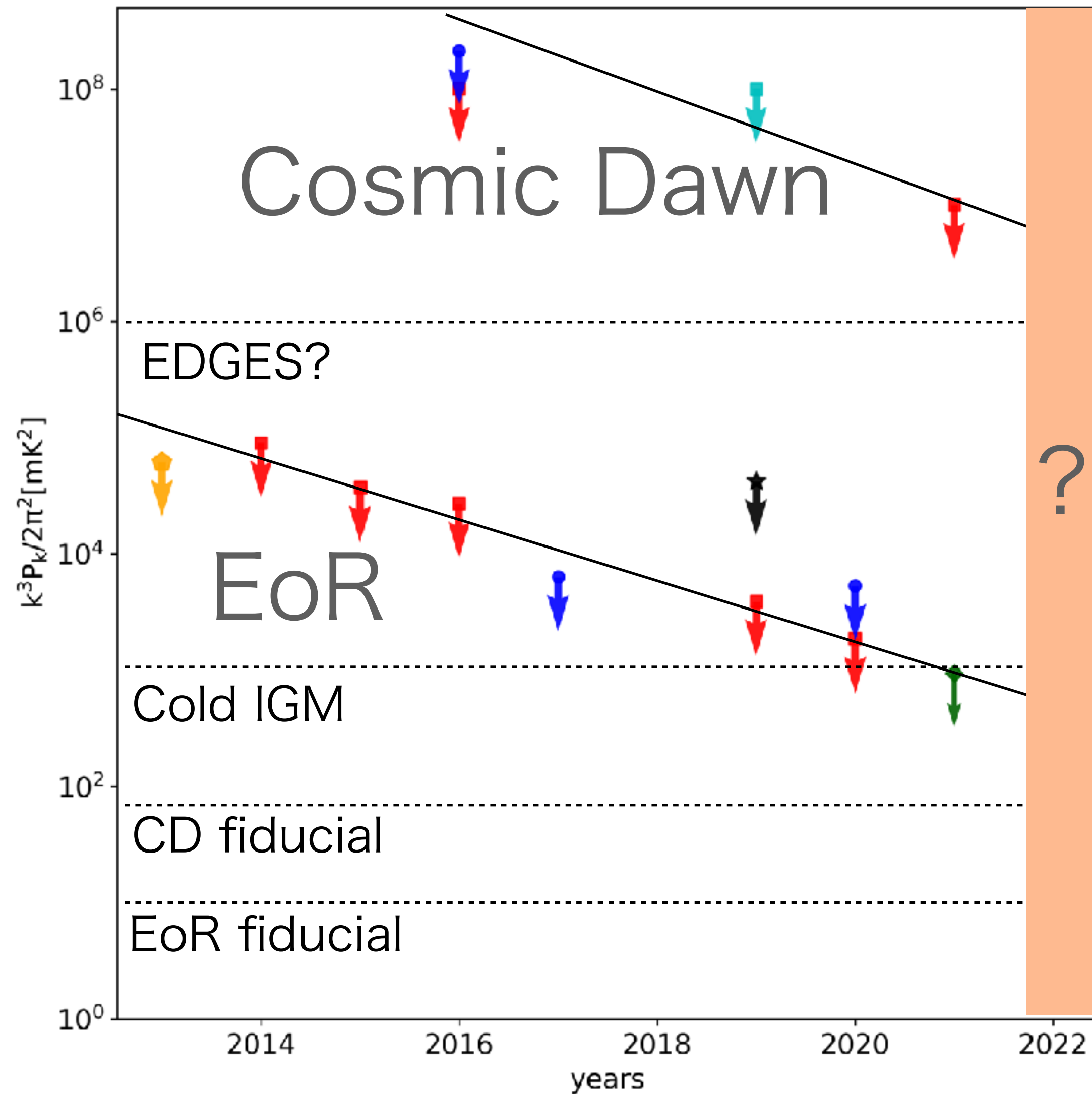
手法の比較 (Hothi+2020)



どちらかといえばGPRが良い結果を見せている

In progress...

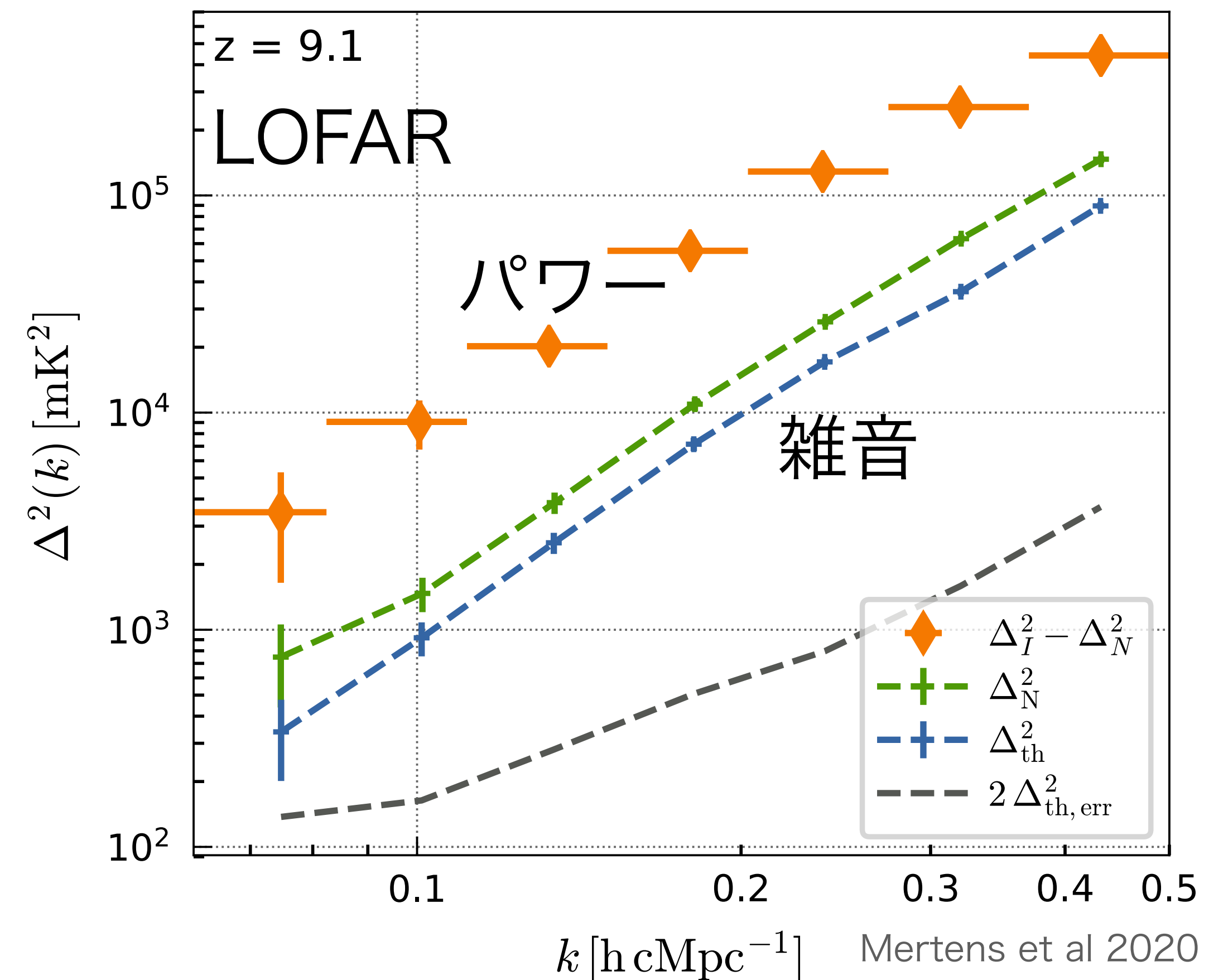
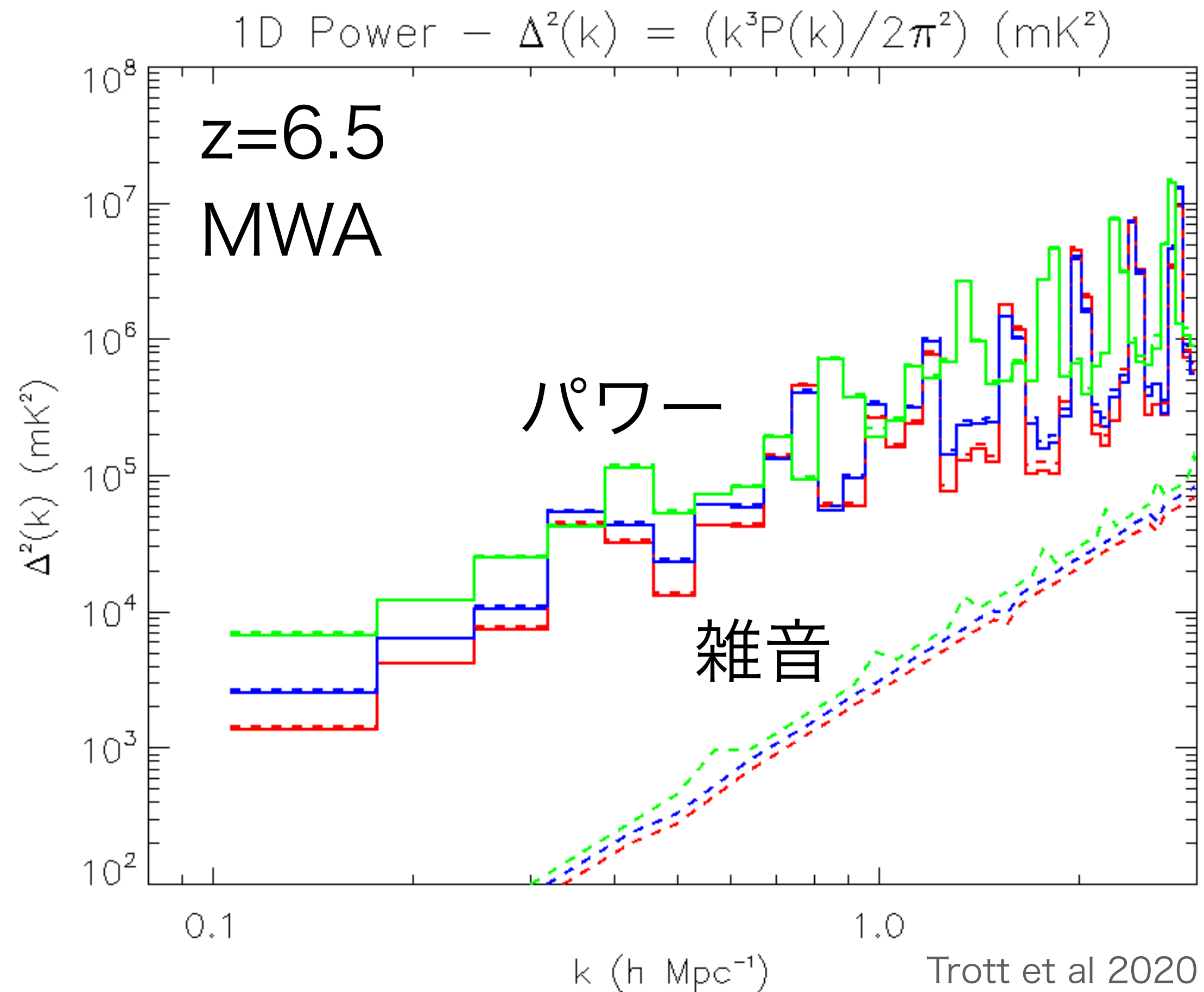
波数 $0.05 < k < 0.5 \text{ Mpc}^{-1}$, 赤方偏移: $6.5 < z < 10$ (下部)、 $13 < z < 20$ (上部)



観測装置や系統誤差の理解が日々進歩し
新たな手法・ソフトウェアが活発に開発され
パワースペクトルの上限も年々下がっている

各装置のベストなパワースペクトル

熱雑音ではなく系統誤差(+前景放射)でリミットされている



HERA (現状最も良い上限)

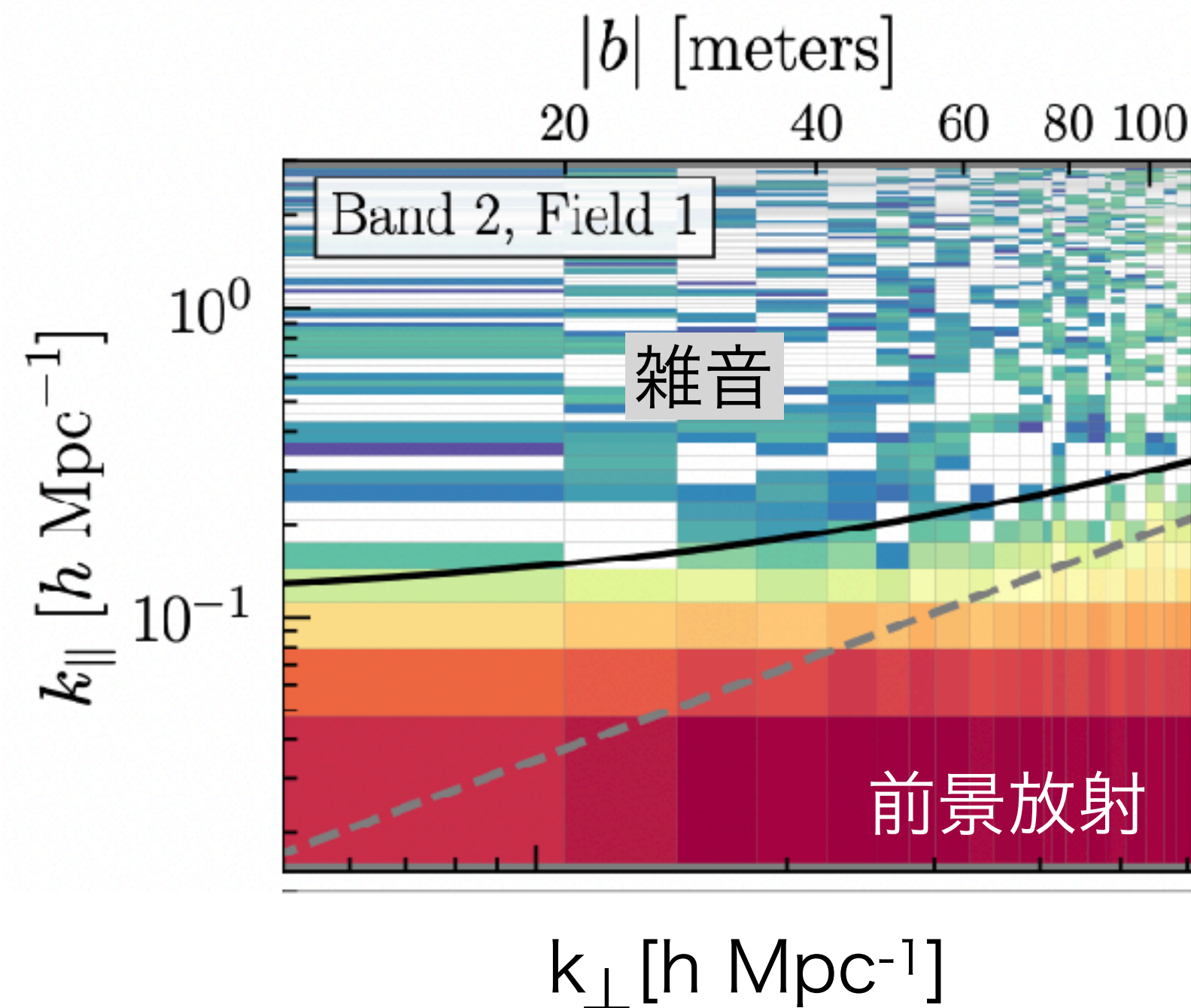
HERA collaboration+2021a

最も強い上限は熱雑音とconsistent

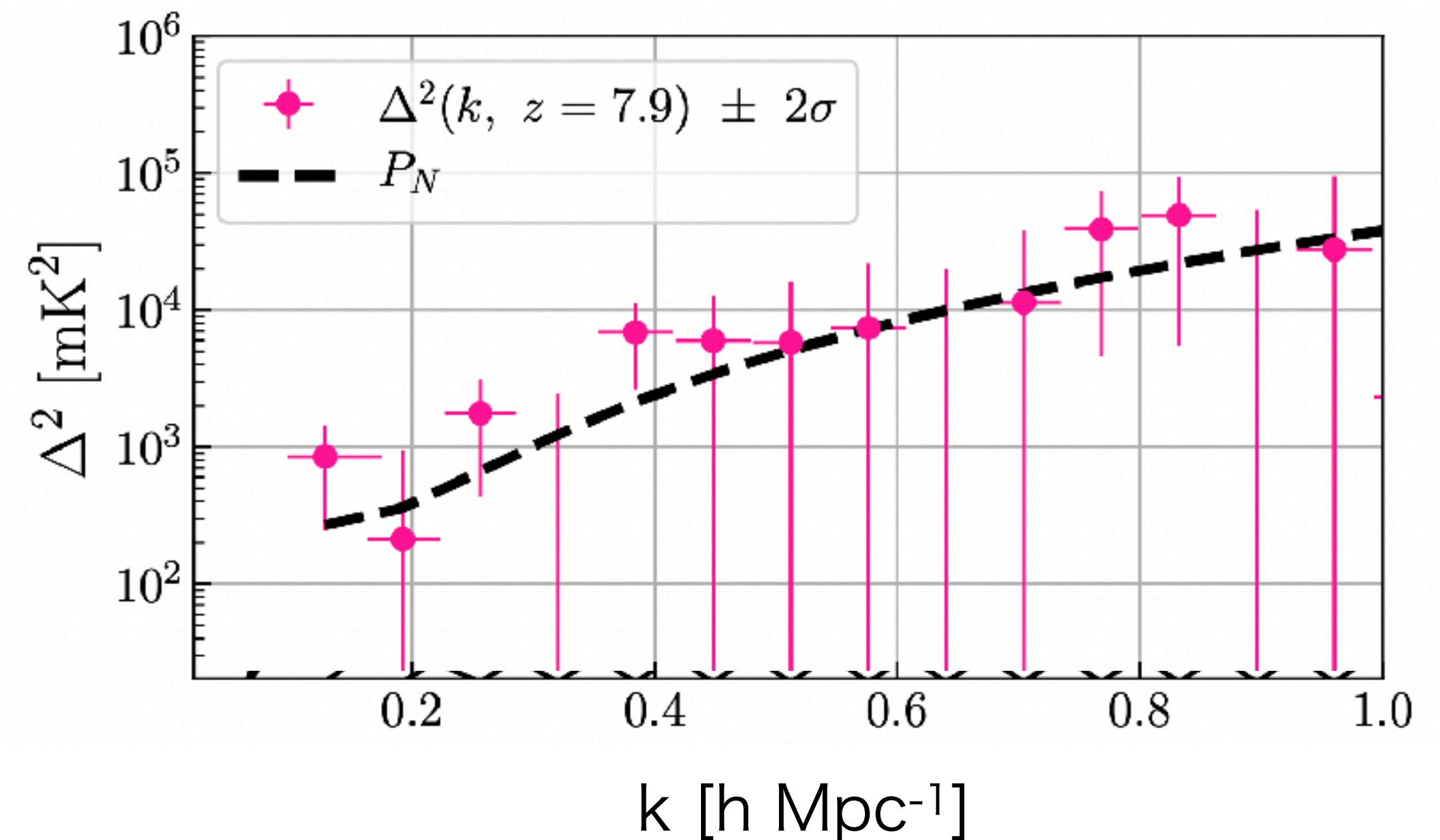
HERAはまだフルスペックの10%(!!)しかも前景放射除去もまだ使っていない → 追加の解析でさらに良くなる？

標準的なモデルよりまだ1~2桁上だが、いくつかのモデルは棄却された→次ページ

2Dパワースペクトル



パワースペクトルの上限

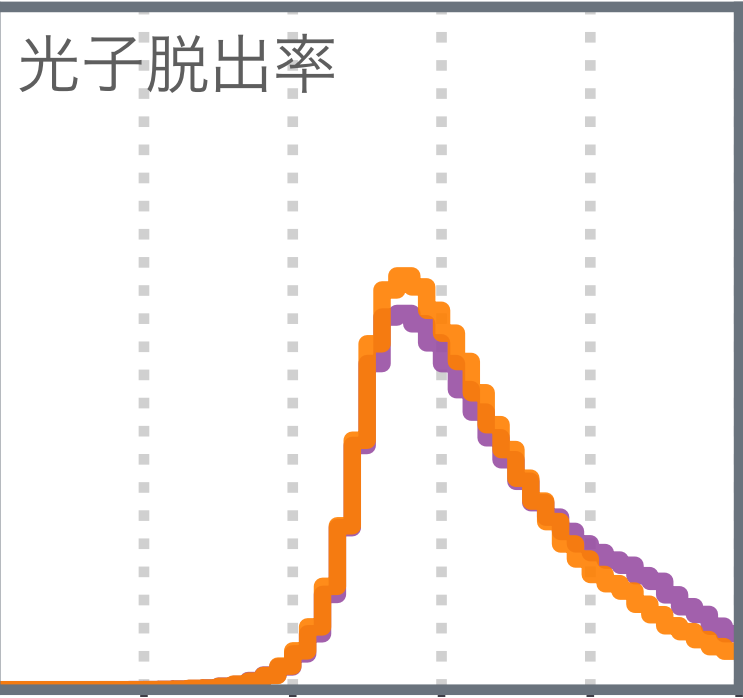


21 cmFASTによる制限

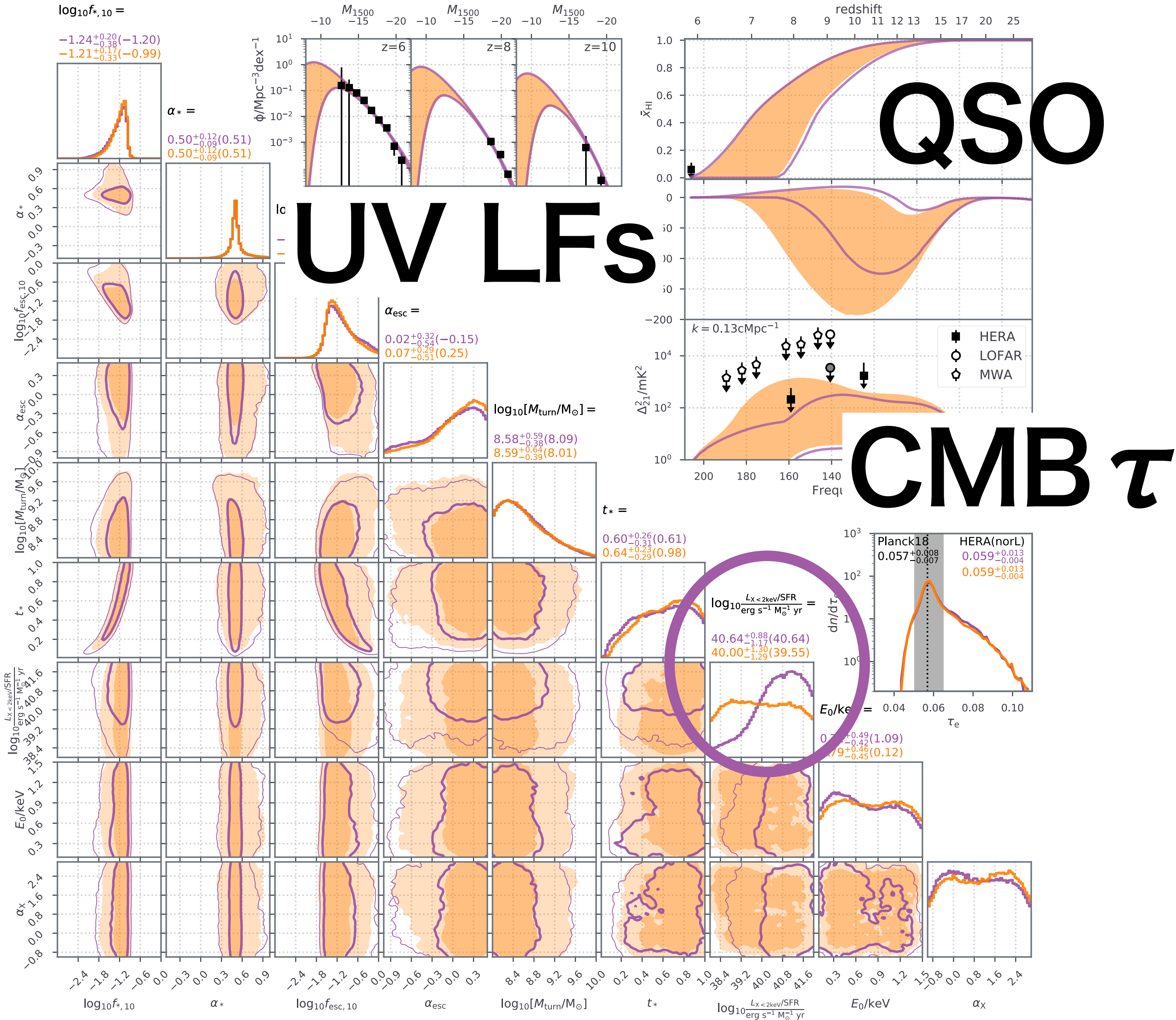
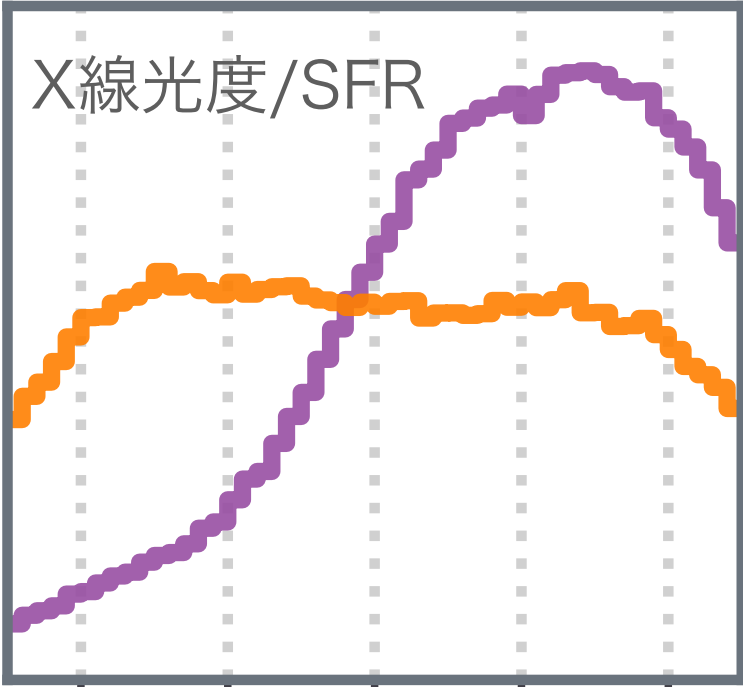
HERA collaboration+2021b

With HERA
Without HERA

$-1.11^{+0.59}_{-0.36}(-1.31)$
 $-1.15^{+0.54}_{-0.33}(-1.53)$



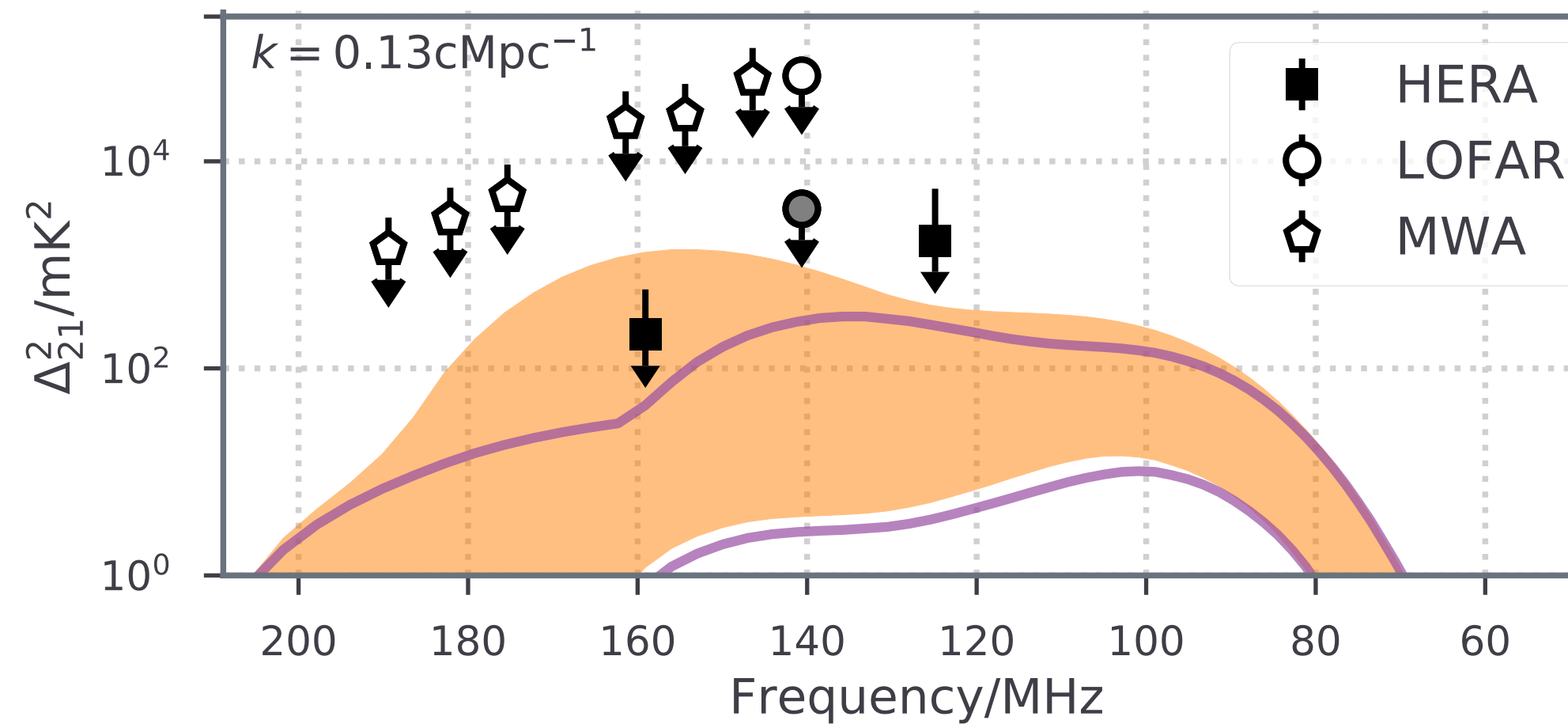
$40.64^{+0.88}_{-1.17}(40.64)$
 $40.00^{+1.30}_{-1.29}(39.55)$



Constraints on X-ray

HERA collaboration+2021b

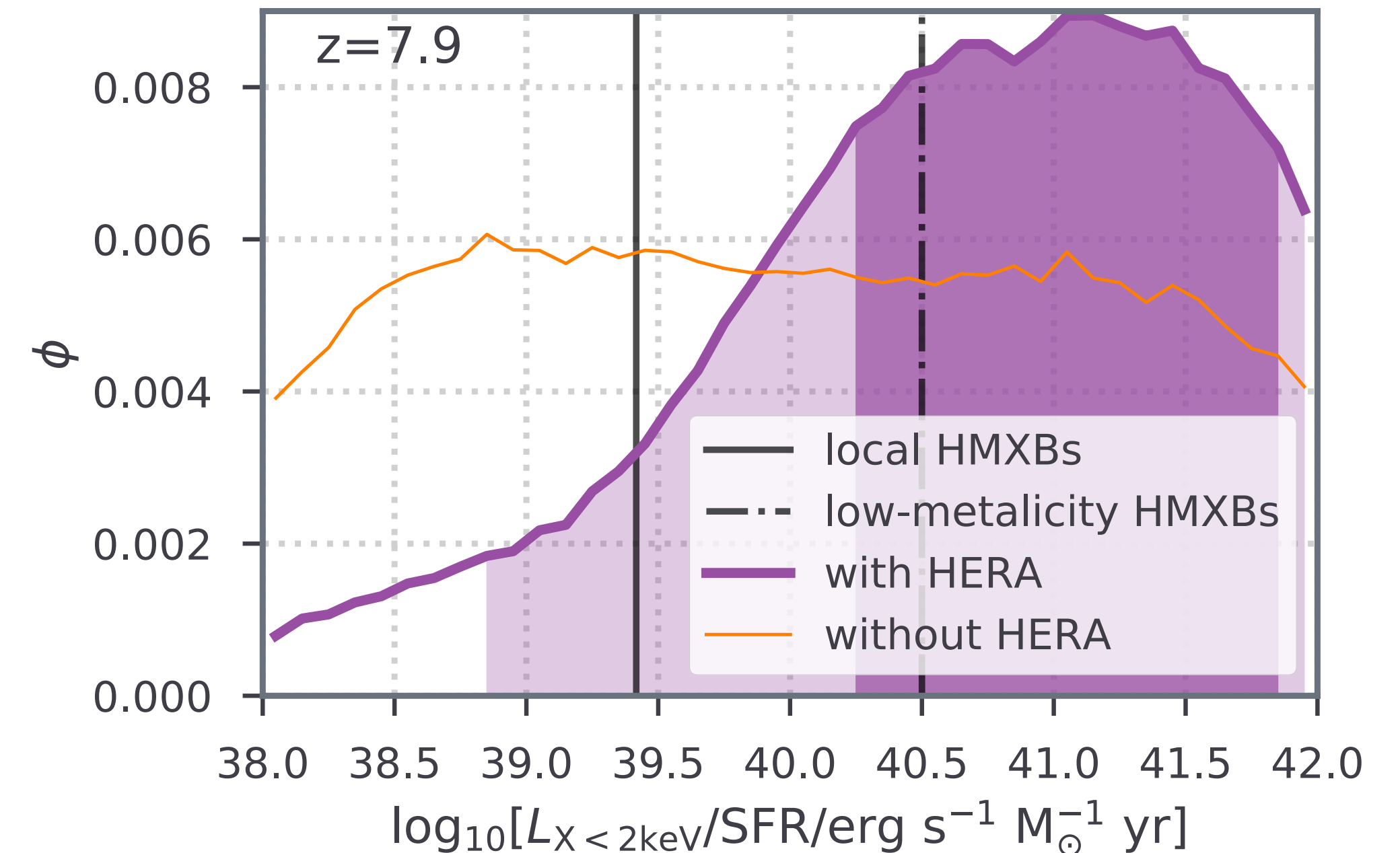
(i) 21cm線輝度温度の揺らぎに制限



(ii) 輝度温度の大きさはスピン温度(~ガス温度)で決まる
→ 冷えすぎたIGMモデルは許されず、
 $z=8$ で多少IGMが加熱されていることを要請

$$\delta T_b \propto \left(1 - \frac{T_\gamma(z)}{T_S} \right)$$

(iii) high- z の天体のX線光度(加熱源)に下限を与える



LocalなHigh Mass X-ray Binaries (HMXBs)
よりも高いX線光度/SFRが好ましい (95%)

電波背景放射

HERA collaboration+2021b

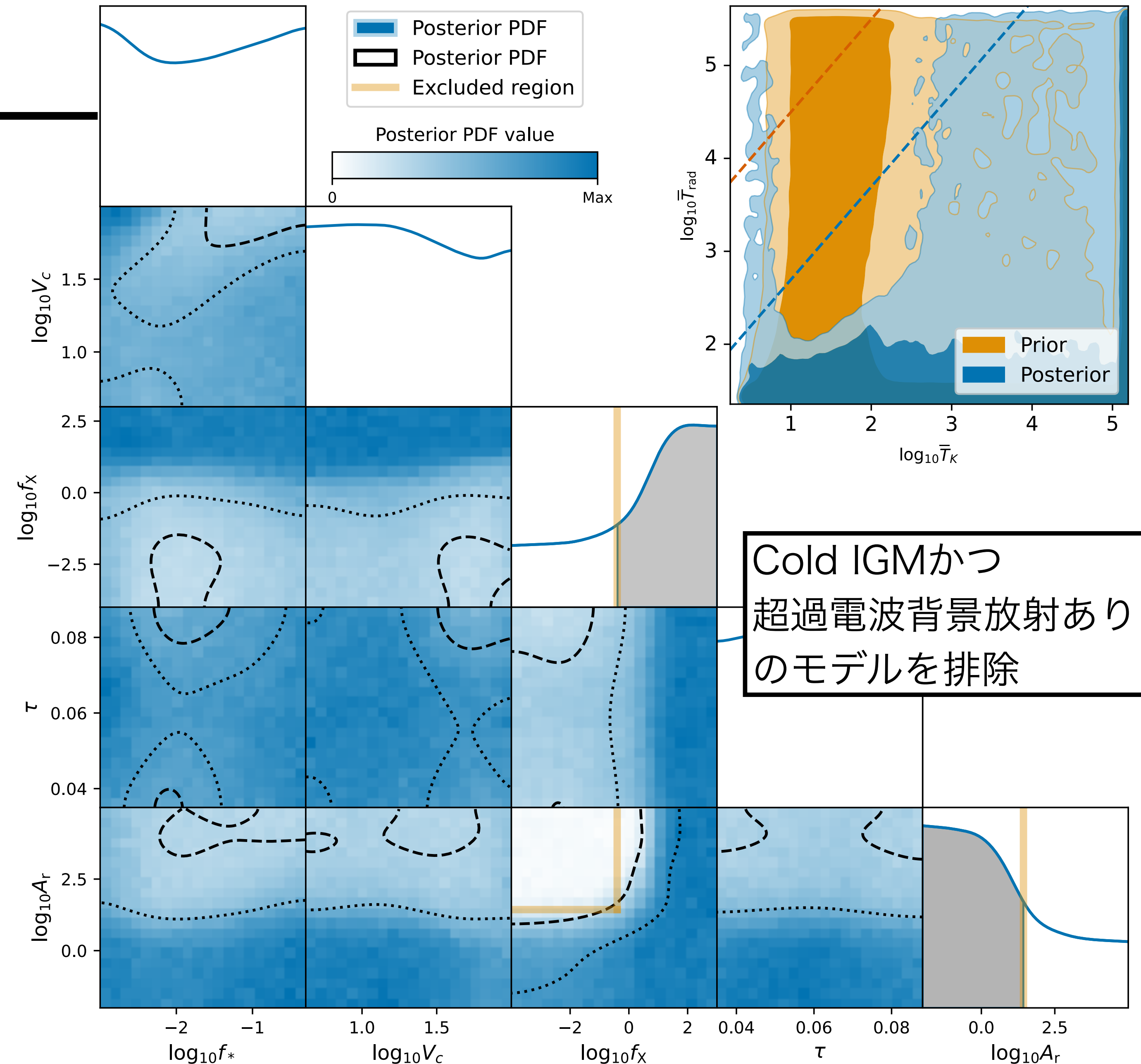
21cmFASTとは異なるシミュレーション
(e.g. Reis+2021)

(EDGESの結果を受けて注目されている)
CMB以外の電波背景放射を仮定

$$T_{\text{rad}} = T_{\text{CMB}}(1+z) \left[1 + A_r \left(\frac{\nu_{\text{obs}}}{78\text{MHz}} \right)^\beta \right]$$

→ Cold IGMで21cm線の強度が上がる

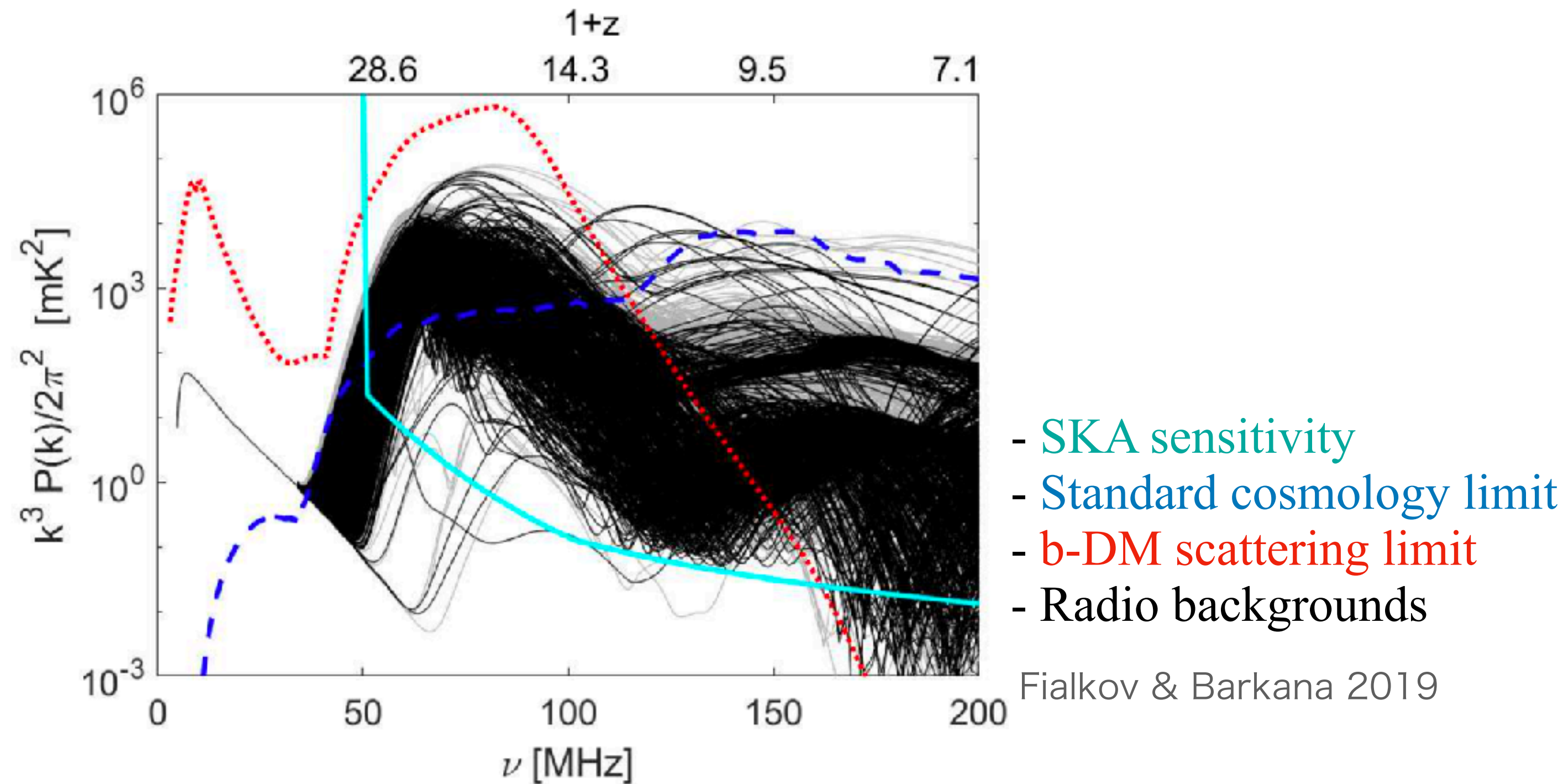
#Simulationの計算が大変なので
Neural Networkを使ったエミュレータを活用



EDGES

今回のHERAの結果からはEDGESの結果を否定も肯定もすることはできなかった (zが違いすぎる)
→ HERA Phase II?

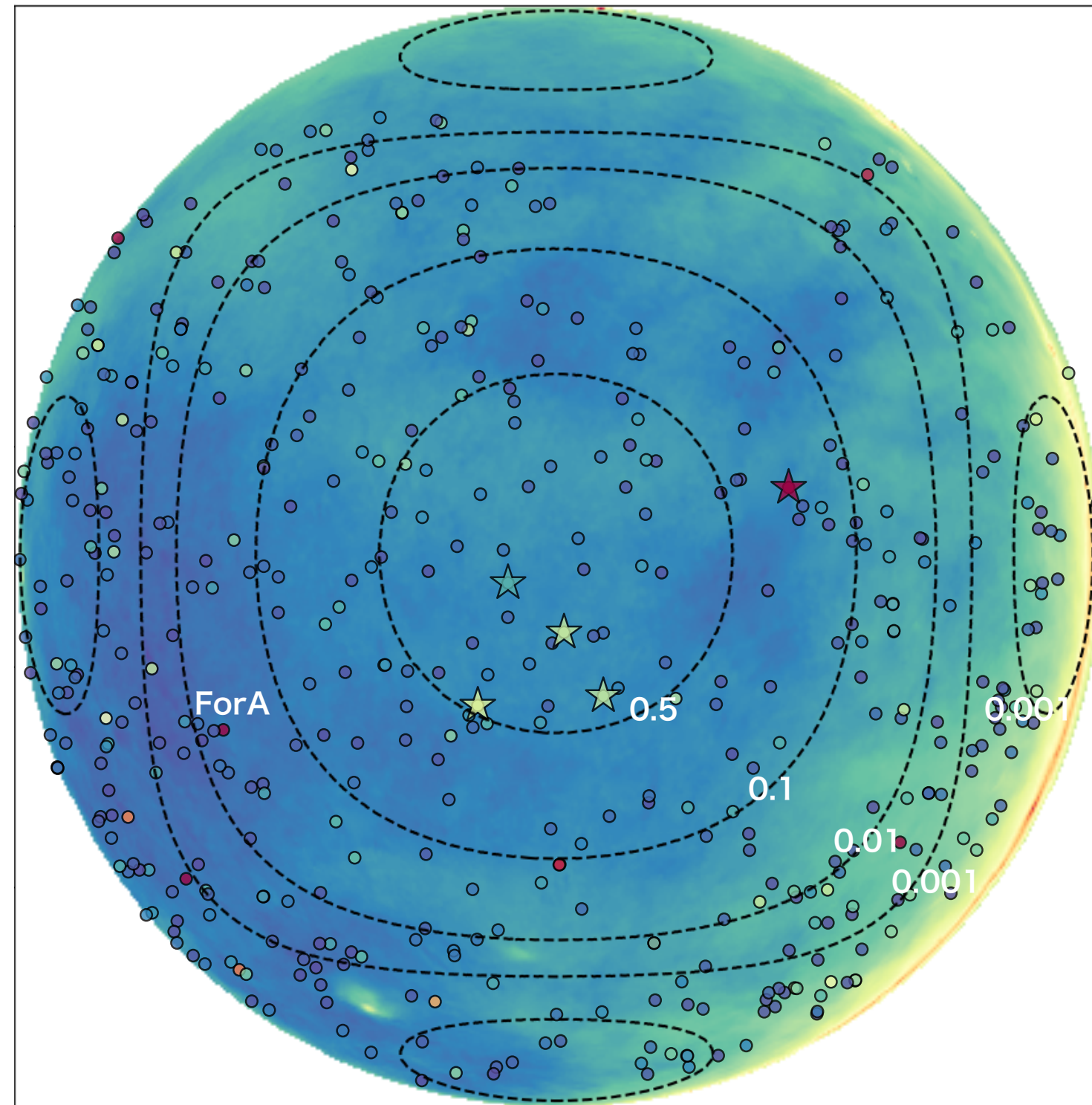
EDGESの結果が本物だと予想されるパワースペクトルも強くなる ($<10^6 \text{mK}^2$)



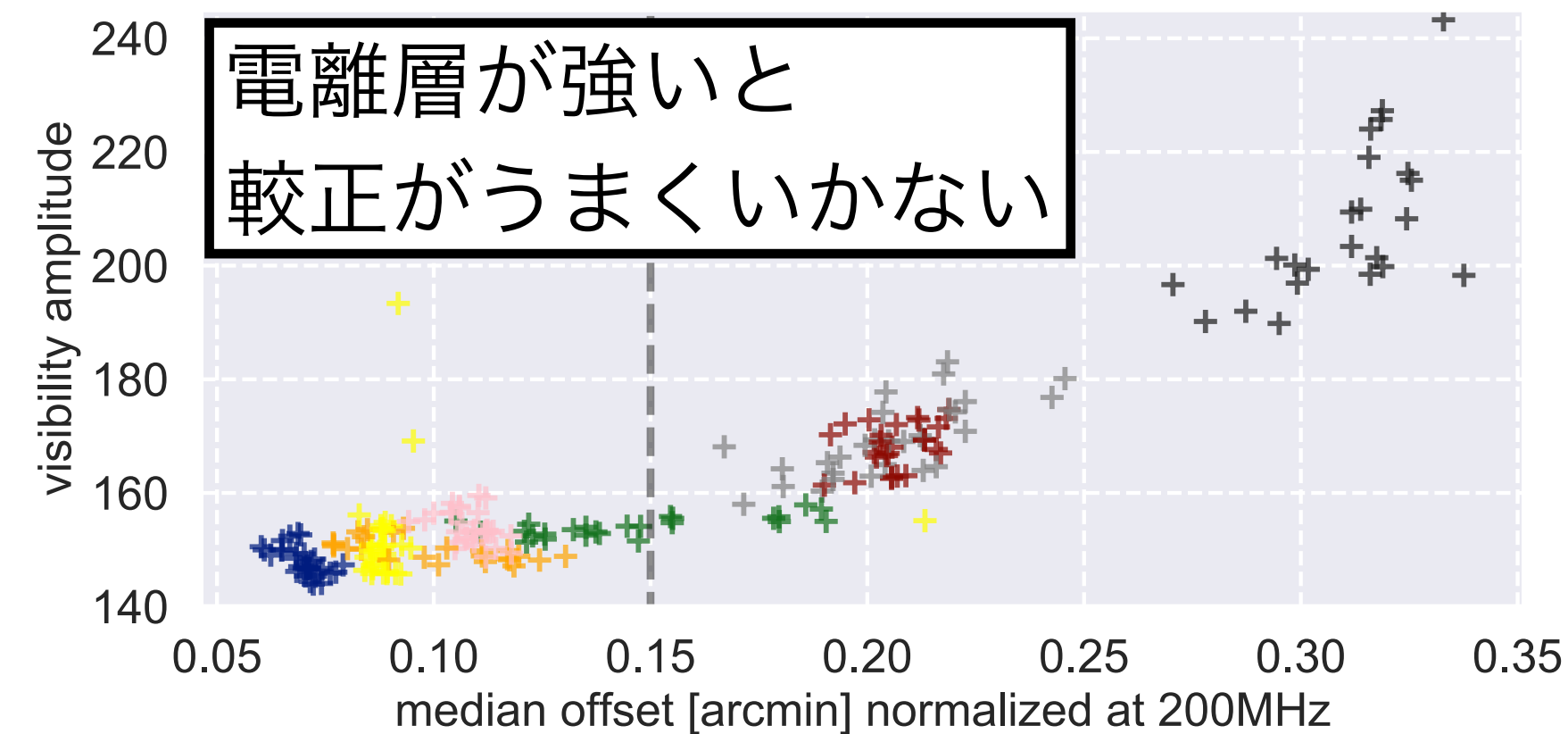
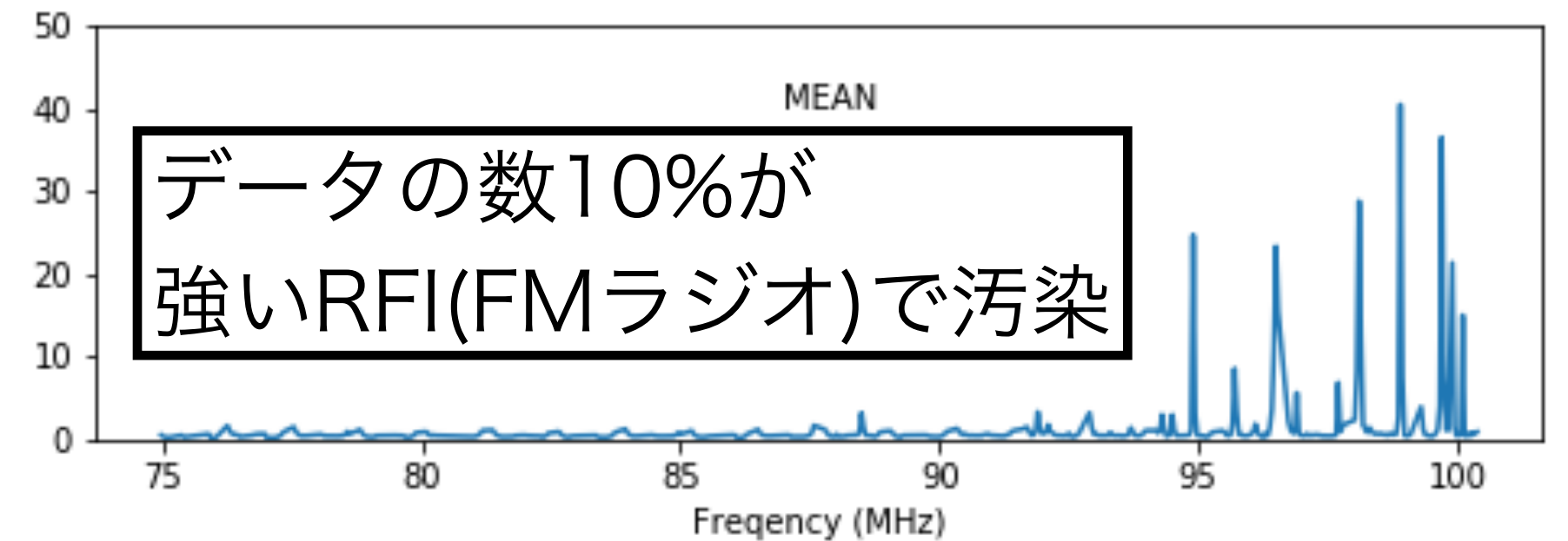
他の望遠鏡で超低周波($14 < z < 28$)の観測・解析が進んでいる → 次ページ

Cosmic Dawnの観測

MWAによる再電離以前(超低周波75-100MHz, $13 < z < 18$)の観測 (SY+2021)



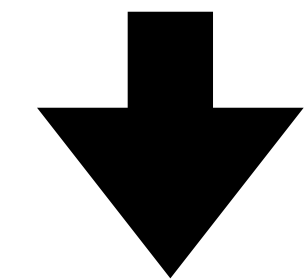
観測の簡易的なイメージ
銀河系放射+系外電波源
各点は10Jy(!)の電波天体
MWAビームも巨大になる



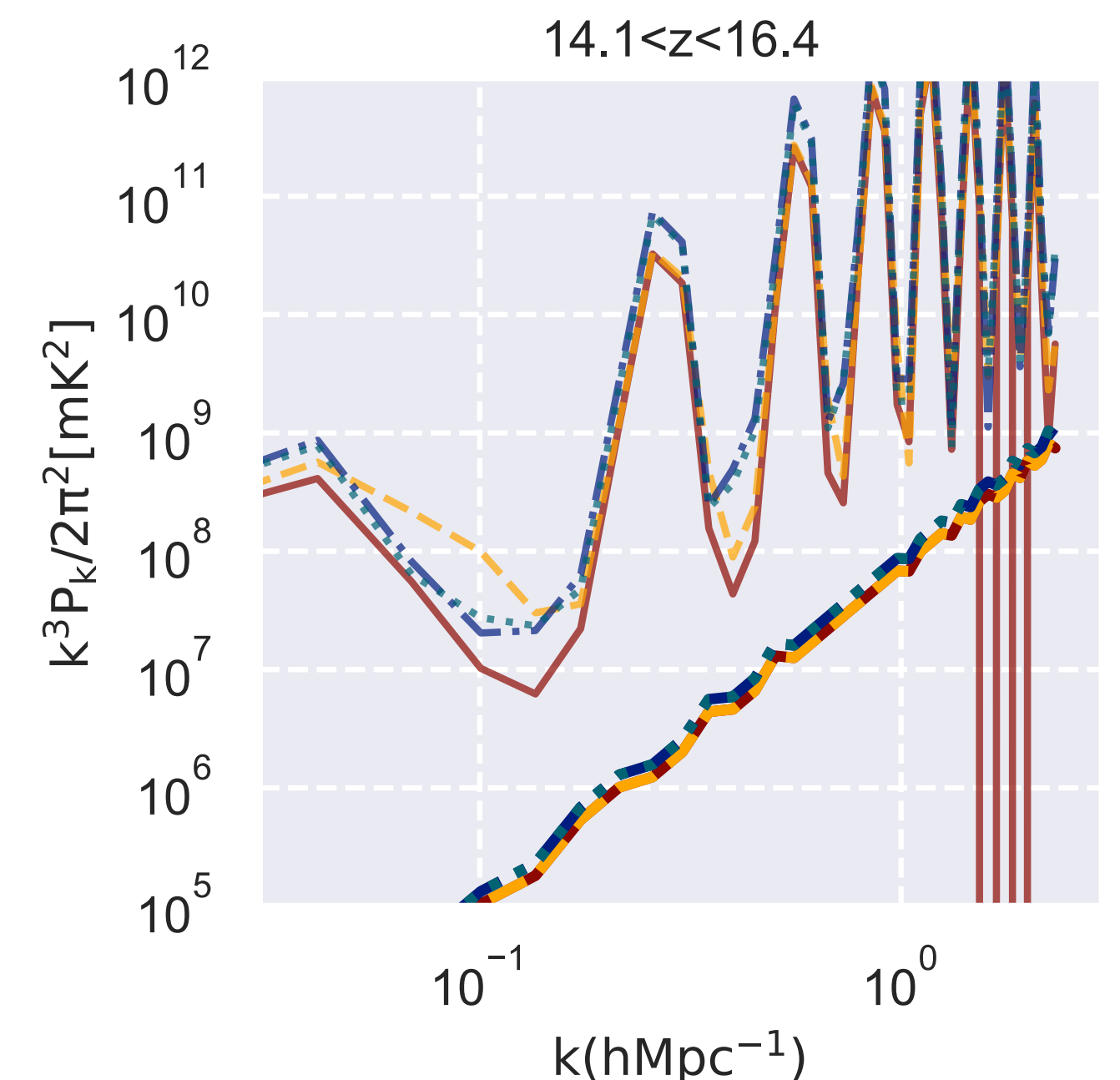
特に明るい天体への較正自体が
余計な誤差を作る

最終的なパワースペクトルは

- ・データの選別(使えるのは3割)
- ・電離層補正のアップデート
- ・強い天体への較正をやめる



以前より上限が5~10倍改善



Current effort & EDGES validation

再電離以前($13 < z < 28$)の観測
既存の望遠鏡で進んでいる

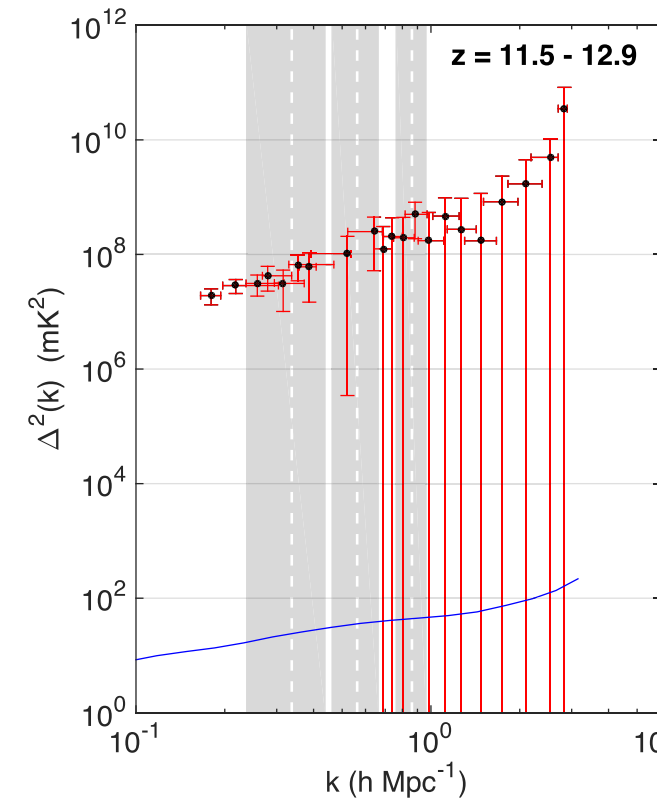
上限値は $\sim 10^7 \sim 8 \text{ mK}^2$

標準的なモデルより5桁くらい上

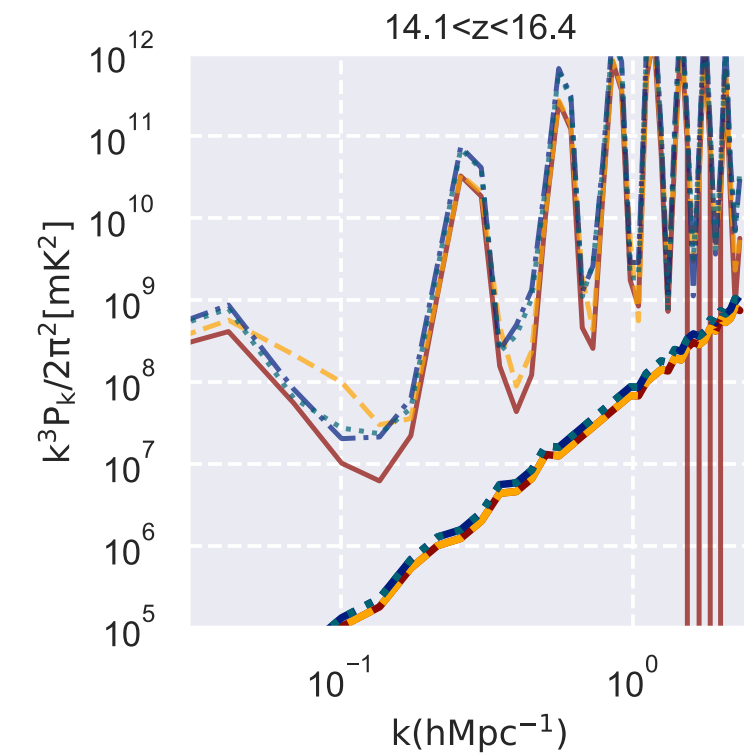
(なぜここまで悪いのか)

- ・ 解析がEoRを主に行われていた
- ・ 系統誤差がより強力になる…
- 電離層の影響は(1/周波数)に比例
- 前景放射スペクトルは負のべき
- ビームサイズも($\sim 1/\text{周波数}^2$)
- ノイズも周波数 $^{-2.6}$ [K]
- etc

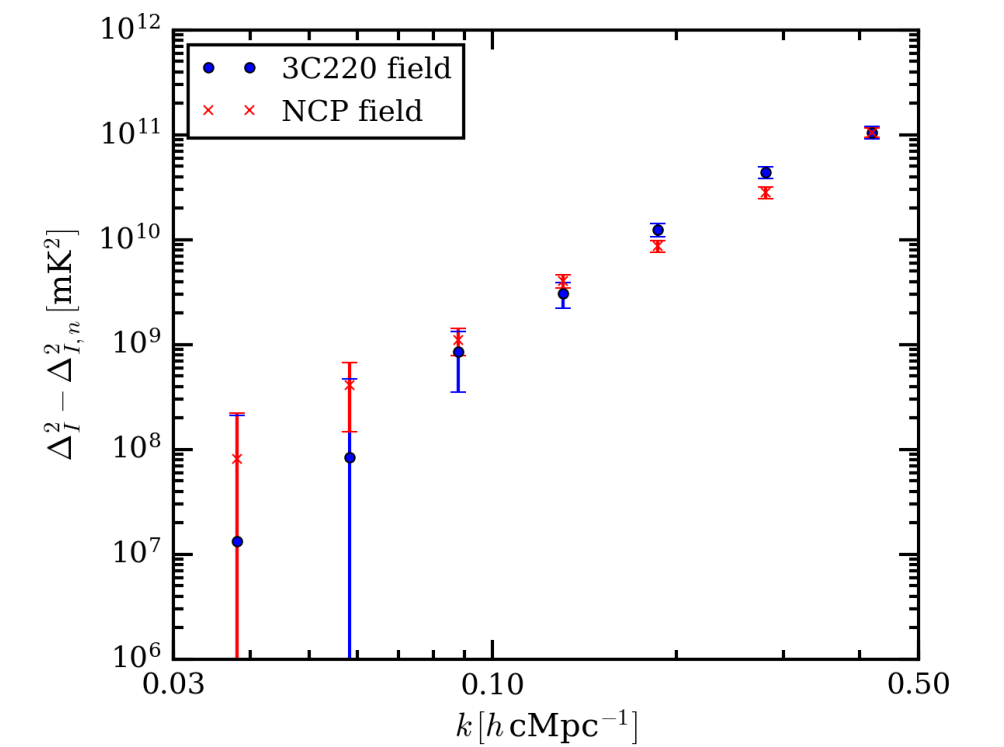
MWA
Ewall-Wice et al 2016



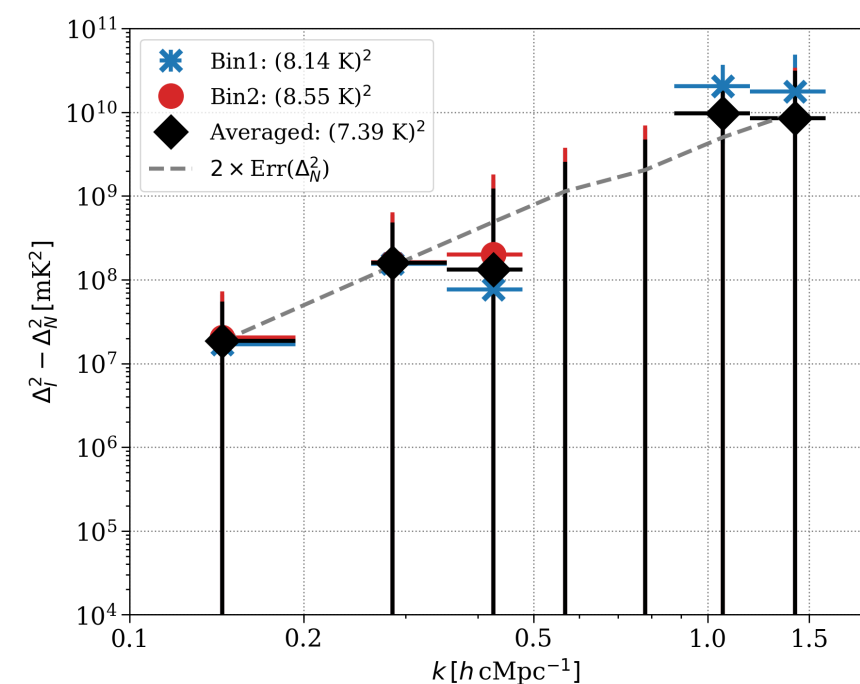
MWA
SY et al 2021



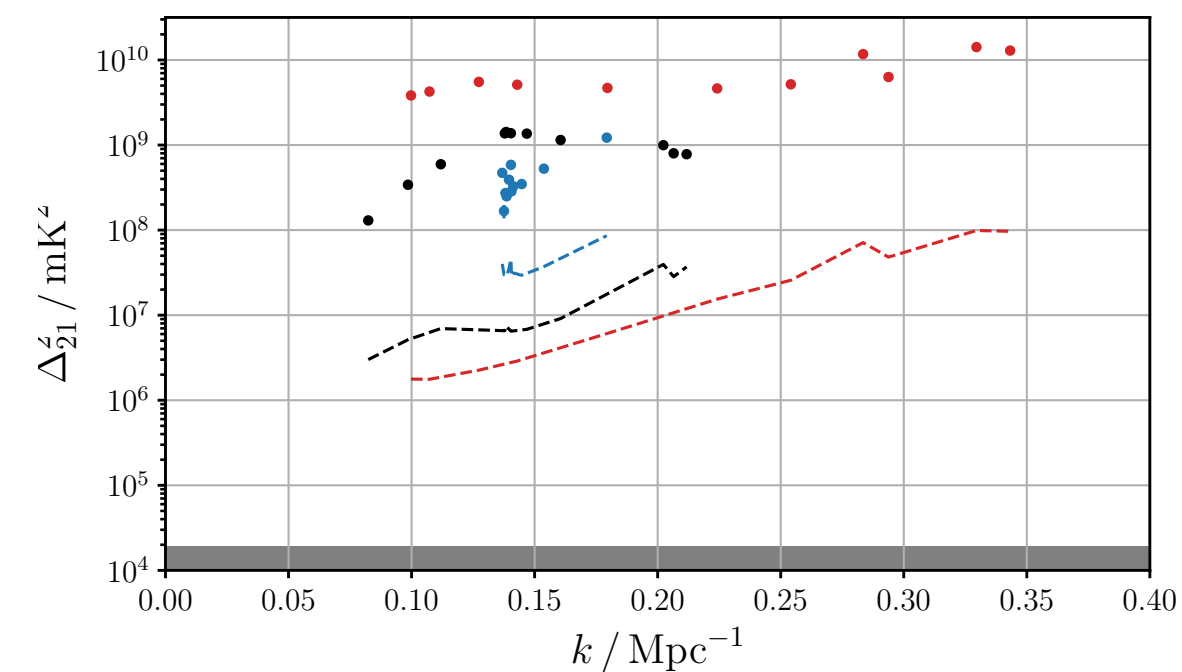
LOFAR
Gehlot et al 2019



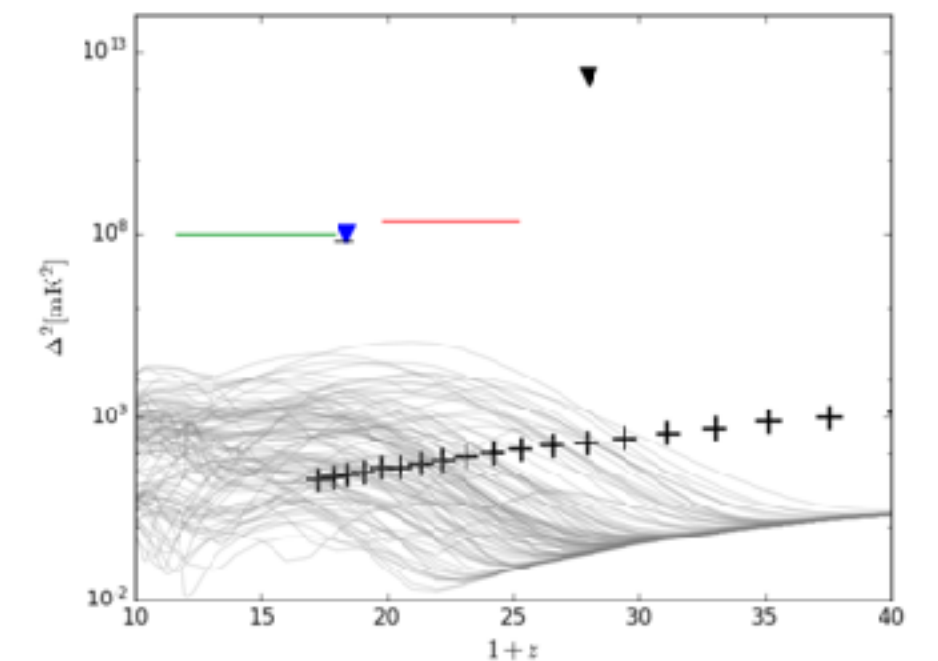
AARTFAAC
Gehlot et al 2020



OVRO-LWA
Eastwood et al 2019



OVRO-LWA
Garsden et al 2021



将来計画

MWA Phase III

receivers (digital system and the analogue signal conditioning)の交換

- ・ 疎チャンネル(1.28MHz)ごと起きていた信号損失対策
- ・ 低周波を50MHzまで拡張
- ・ MWAX correlator により256タイルを同時稼働可能に

2021年以降に本格運用

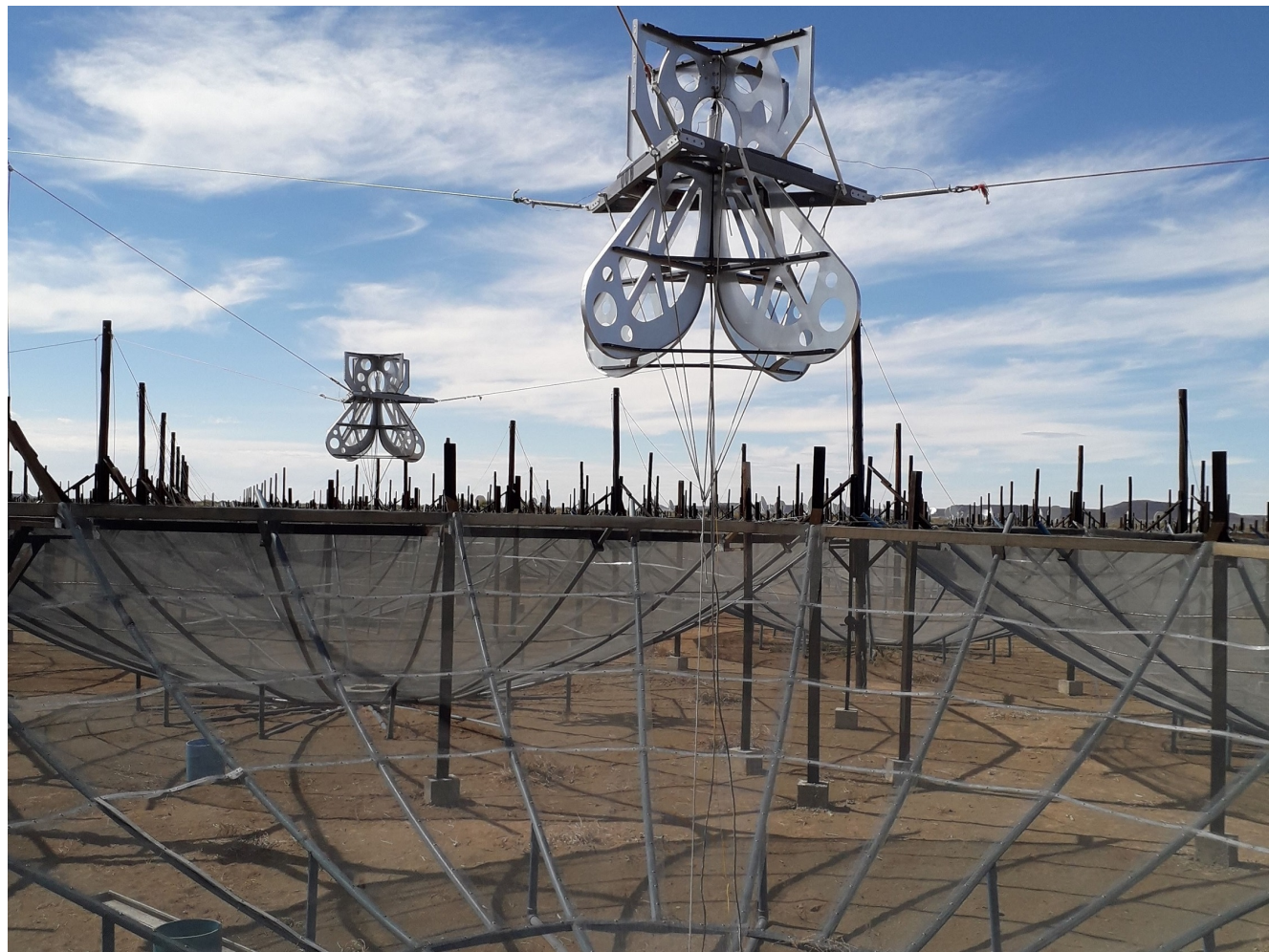
LOFAR 2.0 (Edler+2021)

Digital Upgrade for Premier LOFAR Low-band Observing

- ・ receiver units 3倍 → 96LBA + 48HBA 同時観測
- ・ new clock system

2022年にstage 1, 2023年に本格運用

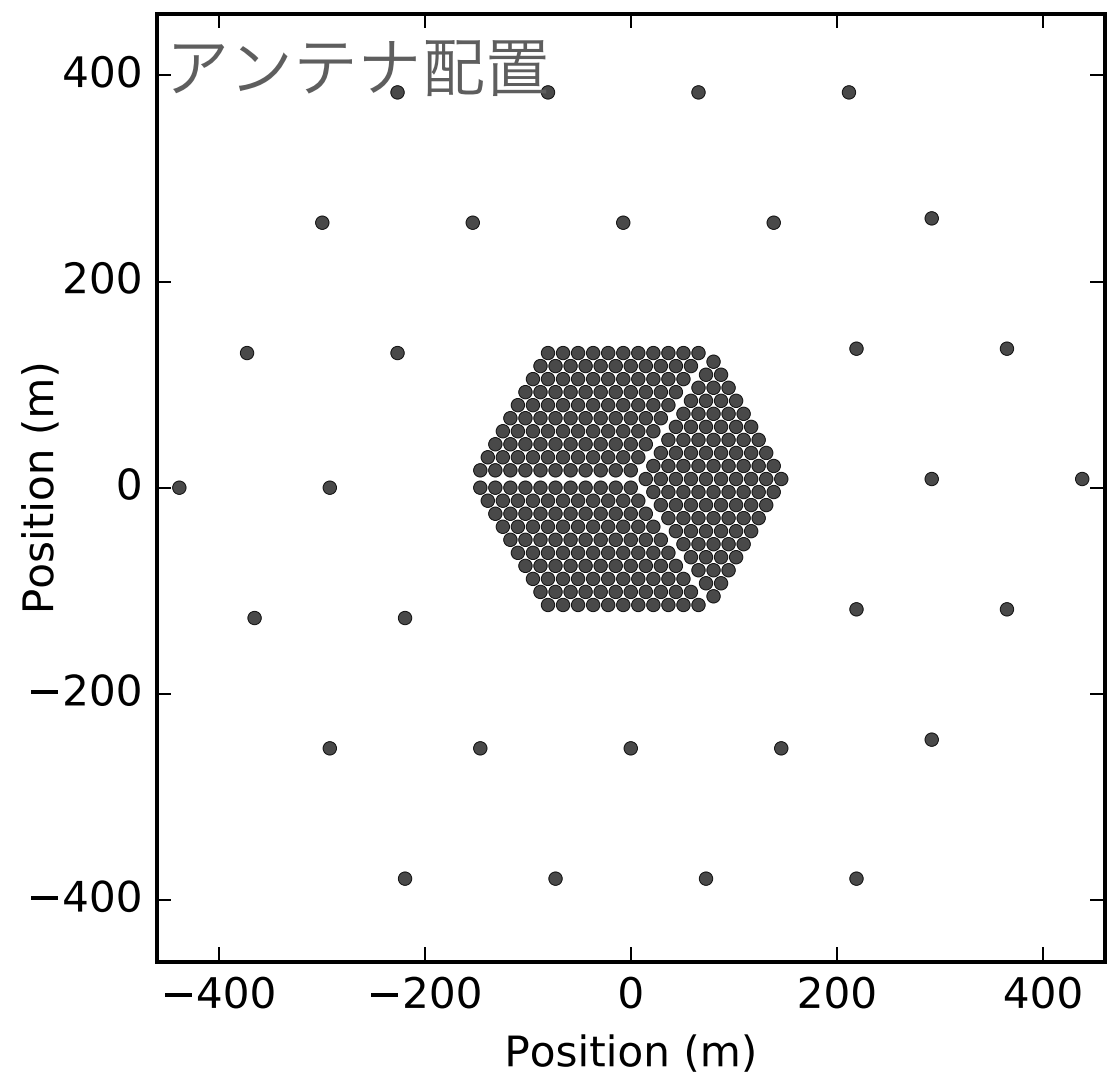
HERA



Fagnoni+2021

HERAは21cm線パワースペクトルに特化した干渉計
EoR windowを基軸に特定のスケールに感度を集中
(2021年時点でアンテナは330台できている)

分解能が悪かったり見えるスケールに限りがあったり
弱点もあるが...



DeBoer+2017

Table 1
Predicted S/N of 21 cm Experiments for an EoR Model with 50% Ionization at $z = 9.5$, with 1080 hr Observation, Integrated over a Δz of 0.8

Instrument	Collecting Area (m ²)	Foreground Avoidance	Foreground Modeling
PAPER	1,188	0.77 σ	3.04 σ
MWA	3,584	0.31 σ	1.63 σ
LOFAR NL Core	35,762	0.38 σ	5.36 σ
HERA-350	53,878	23.34σ	90.97σ
SKA1 Low Core	416,595	13.4 σ	109.90 σ

DeBoer+2017

パワースペクトルへの感度は(場合によって)SKA以上!!

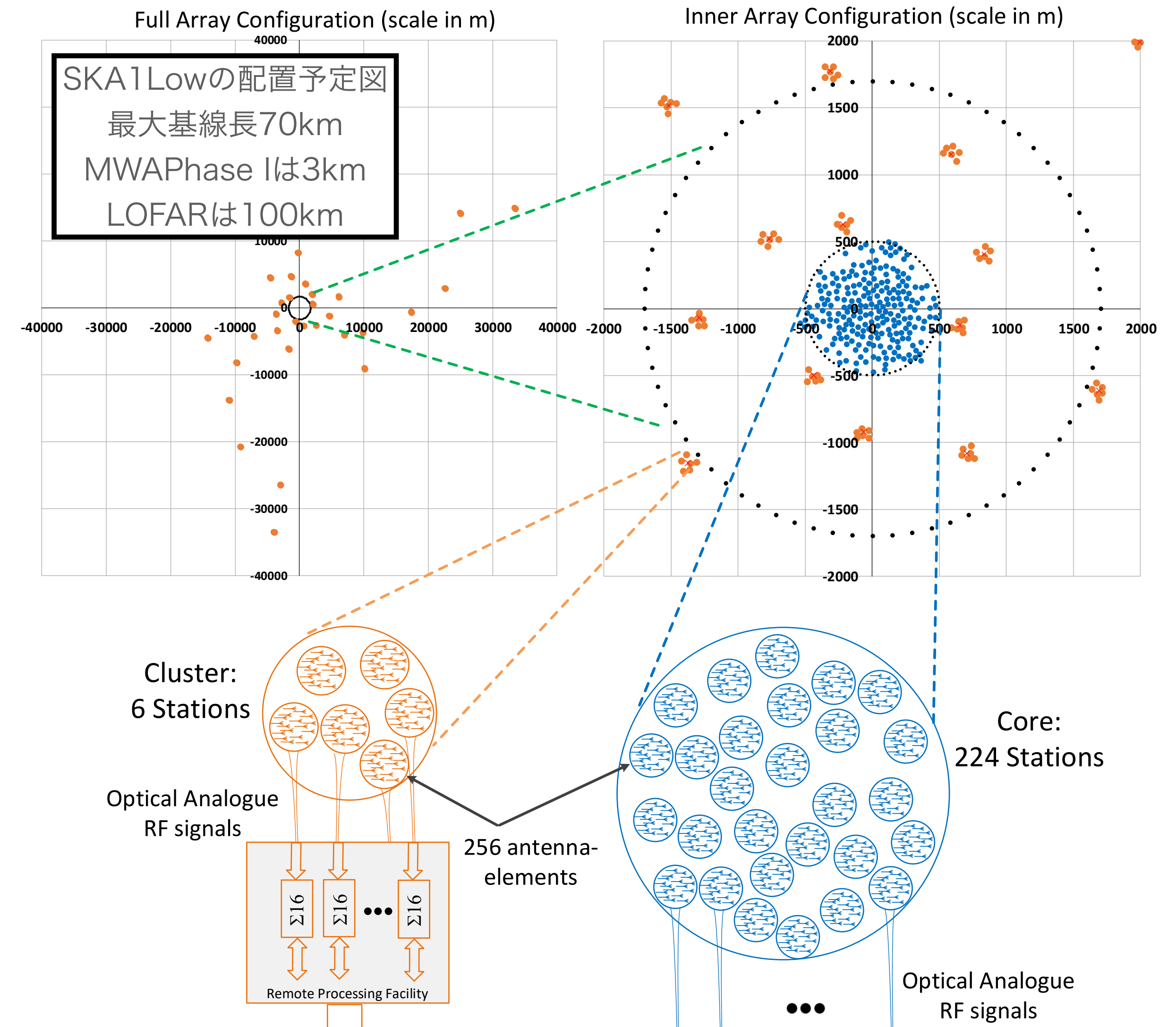
SKA1 Low



Credit: Michael Goh and ICRAR/Curtin.

SKA1 Lowへの期待

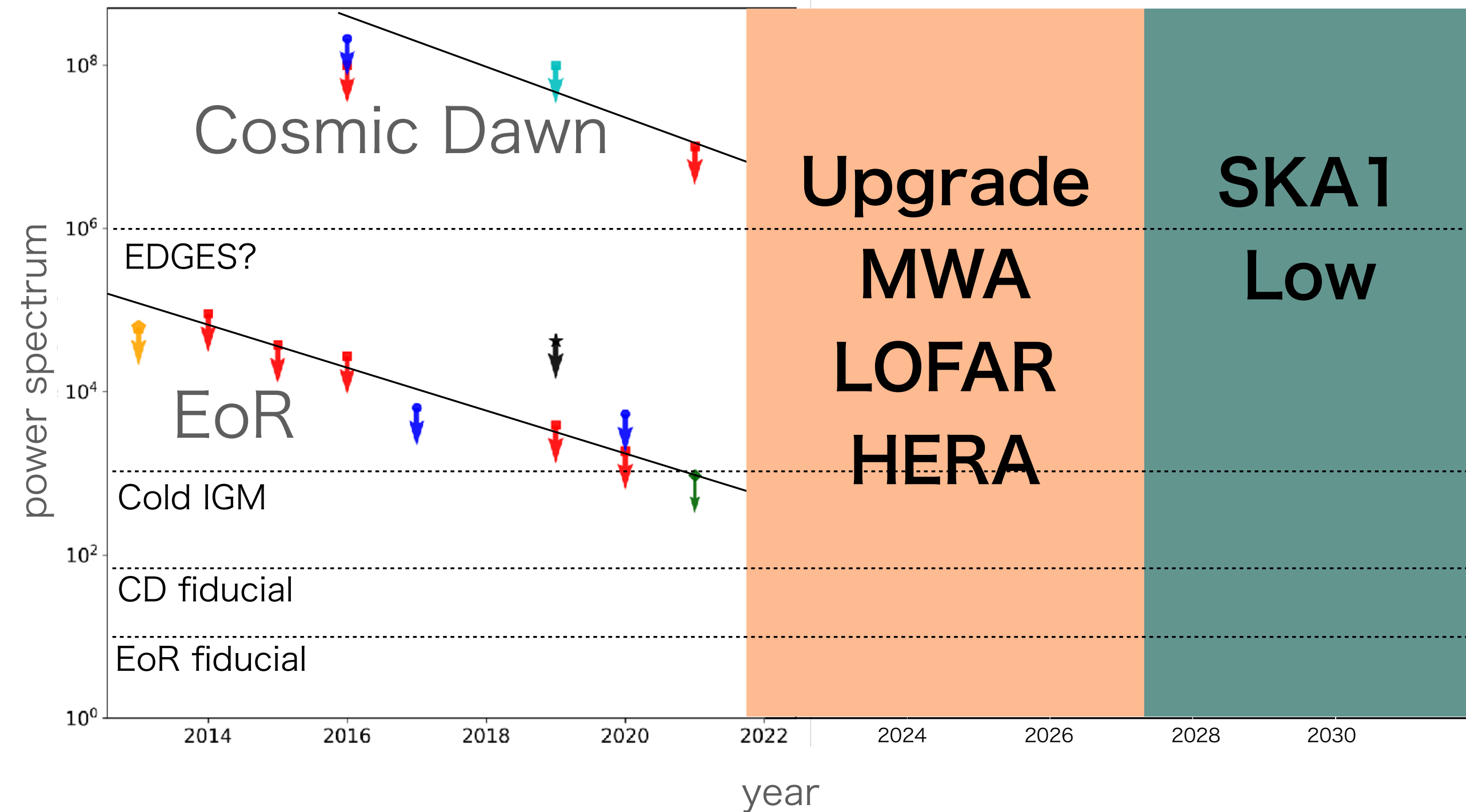
- ・ 高分解能高感度を活かした高精度な電波カタログ
- ・ EoR + Cosmic Dawnのパワースペクトル検出が100-1000時間規模の観測で実現できる
- ・ 究極の目標は21cm線の直接撮像



from SKA Phase 1 Construction Proposal

まとめ

- ・赤方偏移した**21cm線**は再電離から暗黒時代の星形成など物理を探る有用なツール
- ・**21cm線パワースペクトル**は未検出だが、MWAやLOFARなど観測・実験が進行し、さまざまな系統誤差への理解・対策が深化しつつある
- ・**HERA**の最新(2021)結果からCold IGMモデルが棄却localなHMXBより大きいX線光度が要求されるなど当時の天体物理への示唆が得られてきた
- ・**Cosmic Dawn**の観測も少しずつ進行中EDGESの検証までもう一息？
- ・MWAやLOFARのアップデートやHERAのfull operationが目前(2021以降)であり、**SKA1 Low**も建設開始。初期科学運用を経て、2028年に本格稼働する予定



Backup

観測のsystematics

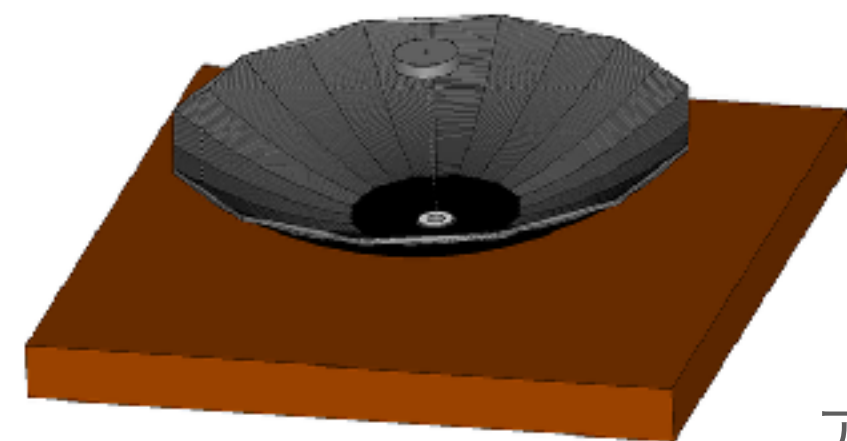
装置の理解

装置由来で信号に周波数依存性が生じる → 前景放射と21cm線を分離できなくなる

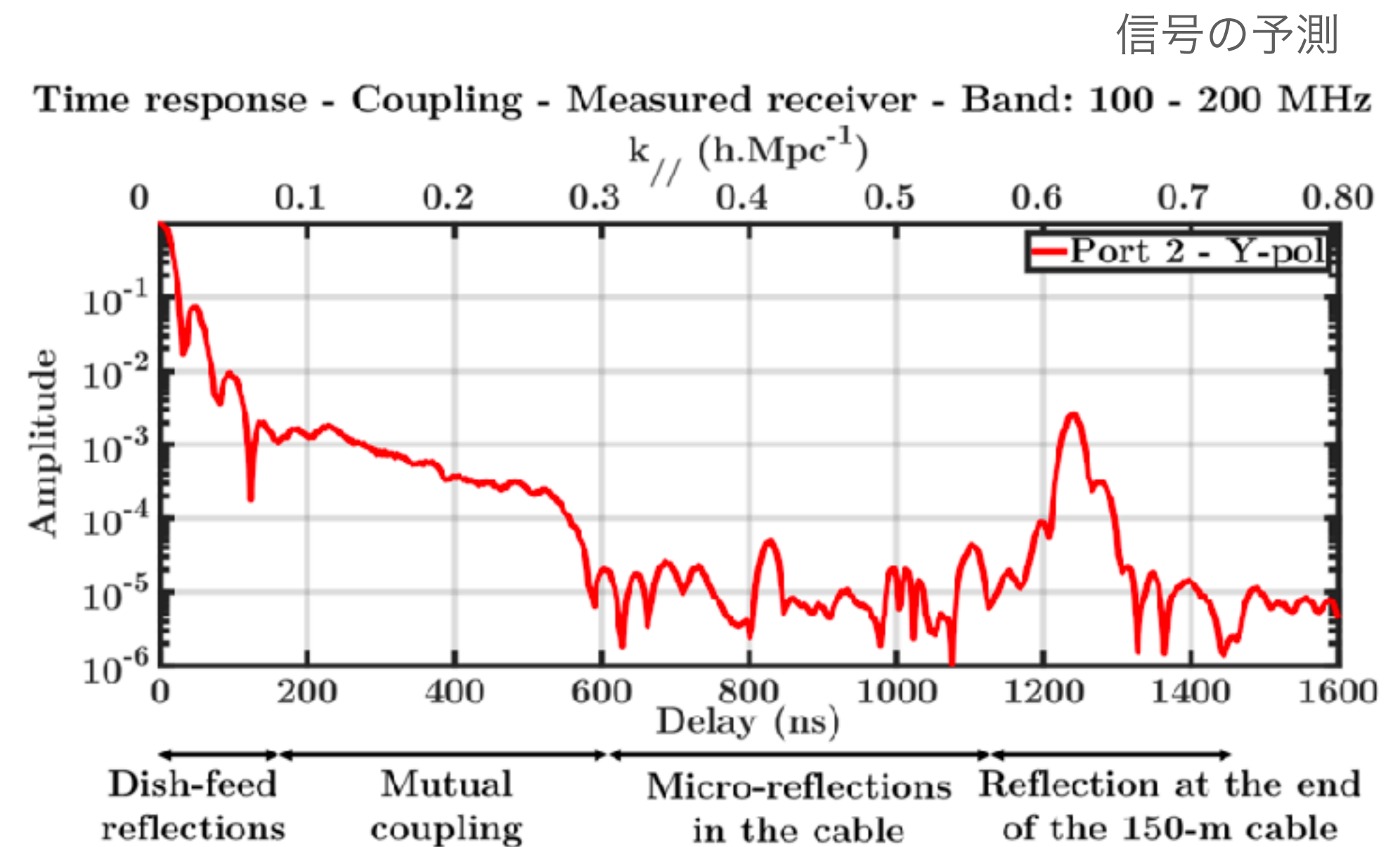
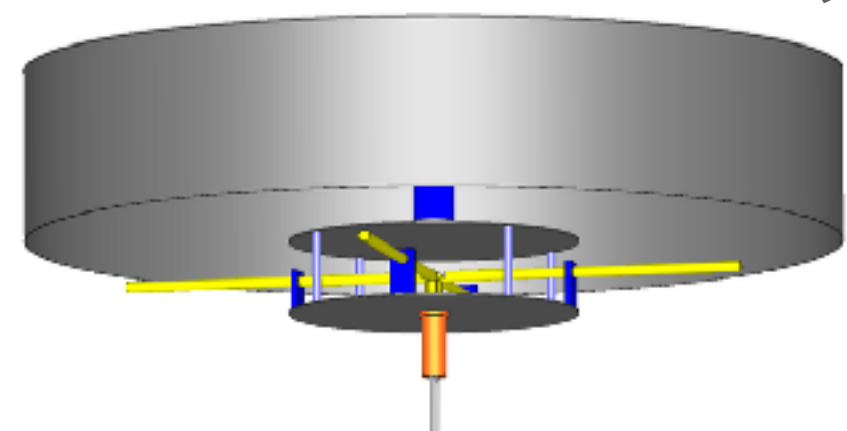
装置を理解・正確にモデル化する(e.g. Fagnoni+2021)



HERA Phase I dish



アンテナのシミュレーション



mutual coupling :

アンテナ同士の相互作用でアンテナのビームが変動

Cable reflection :

ケーブル-受信機間などで反射すると対応する $k_{||}$ で波が生じる

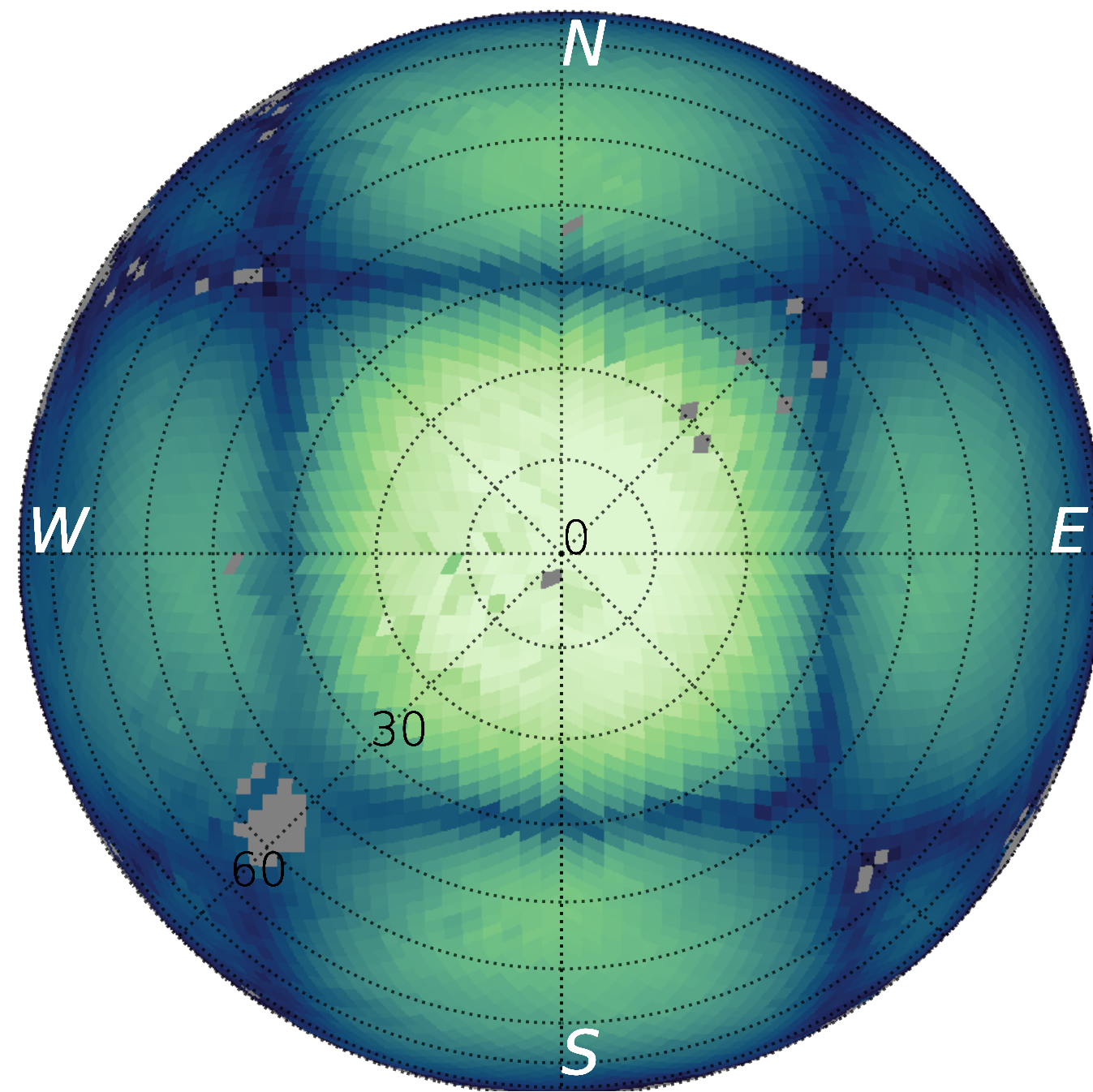
較正方法も開発されている(e.g. Kern+2020)

ビームのモデリング

相互作用込みのモデル化FEE beam model (Sutinjo et al. 2015; Sokolowski et al. 2017)

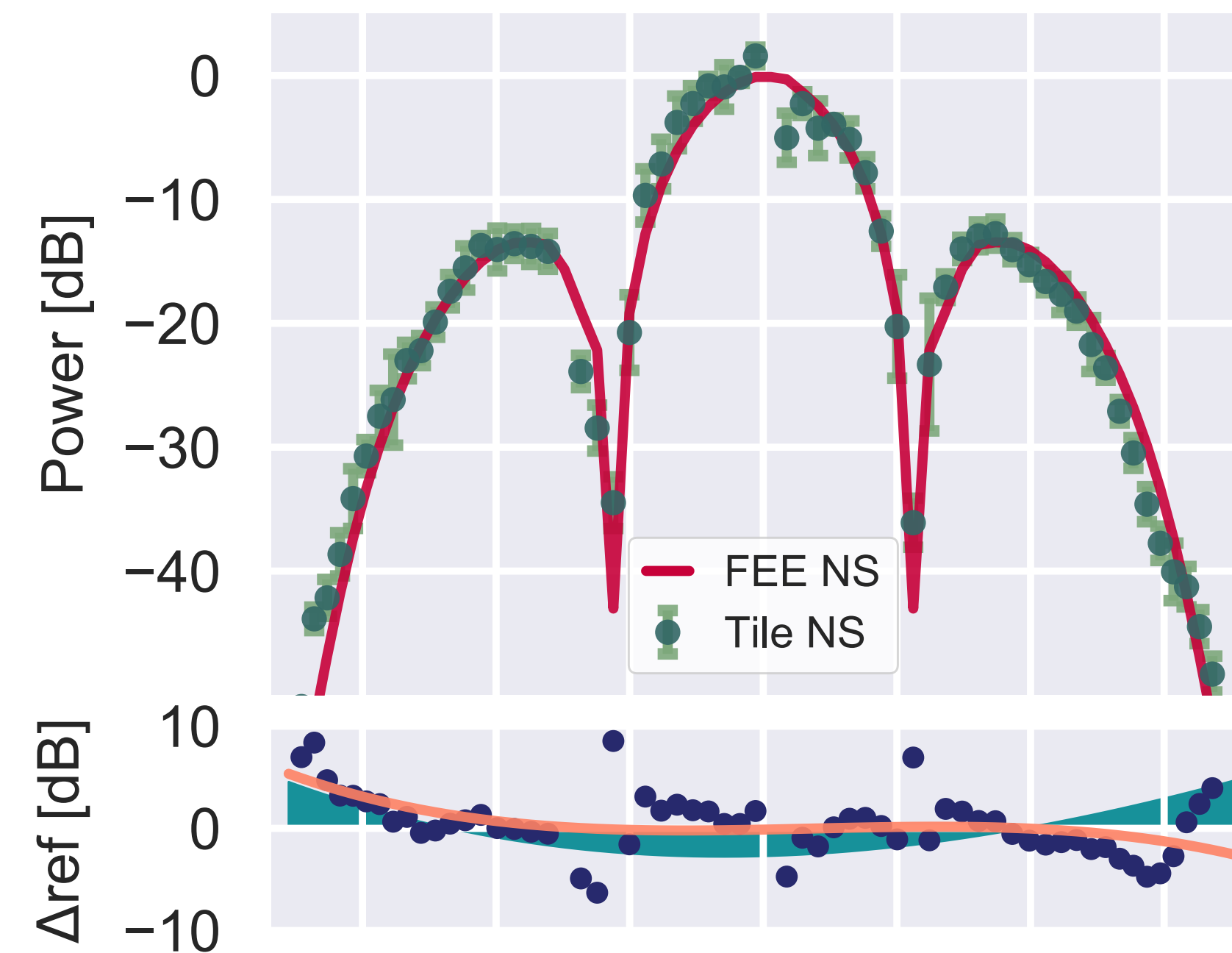
衛星を使ったビームの測定でMWA beam model検証 (Line+2018, Chokshi et al 2021)

(i) S08XX [Zenith]



Chokshi+2021で計測されたビーム

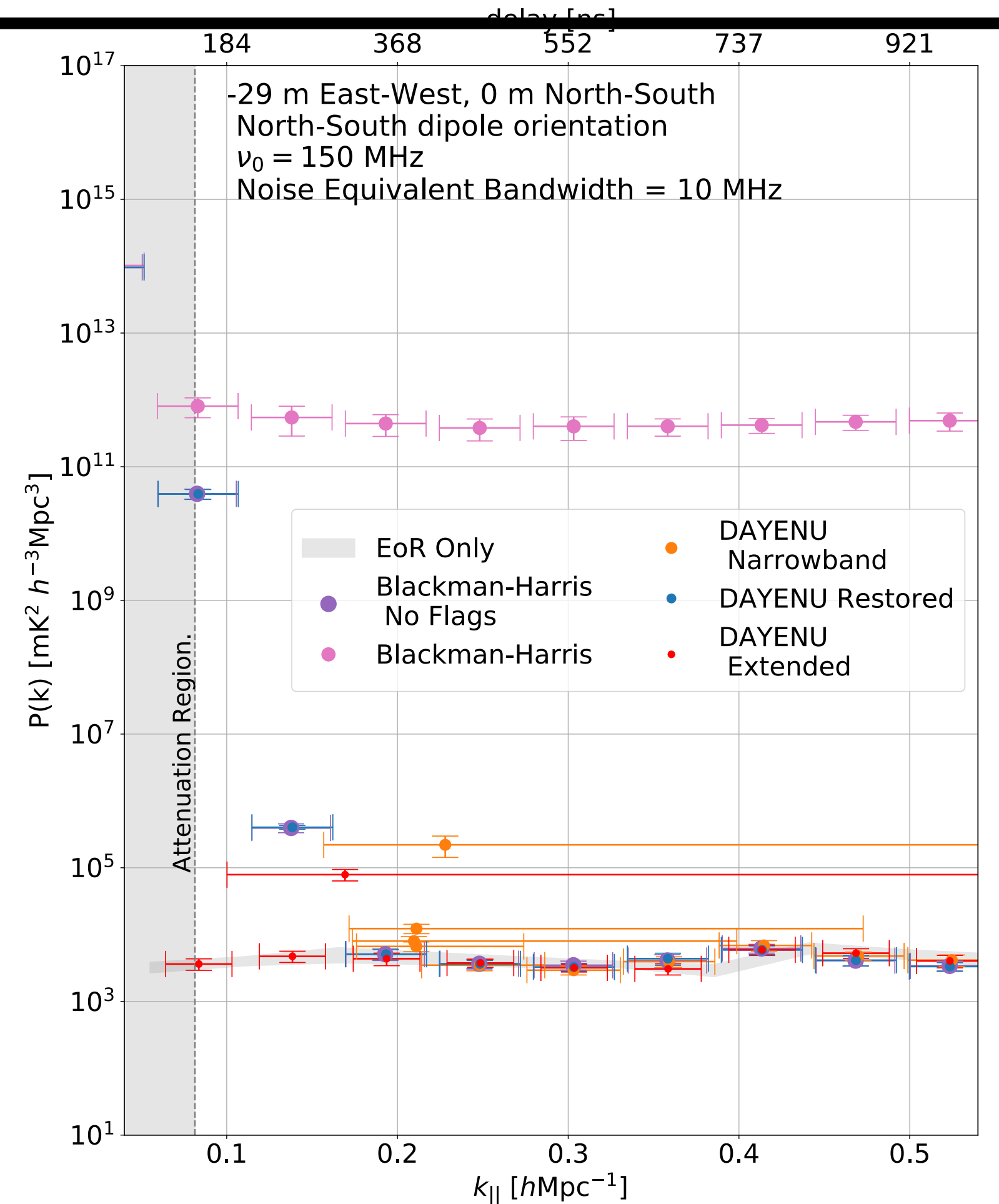
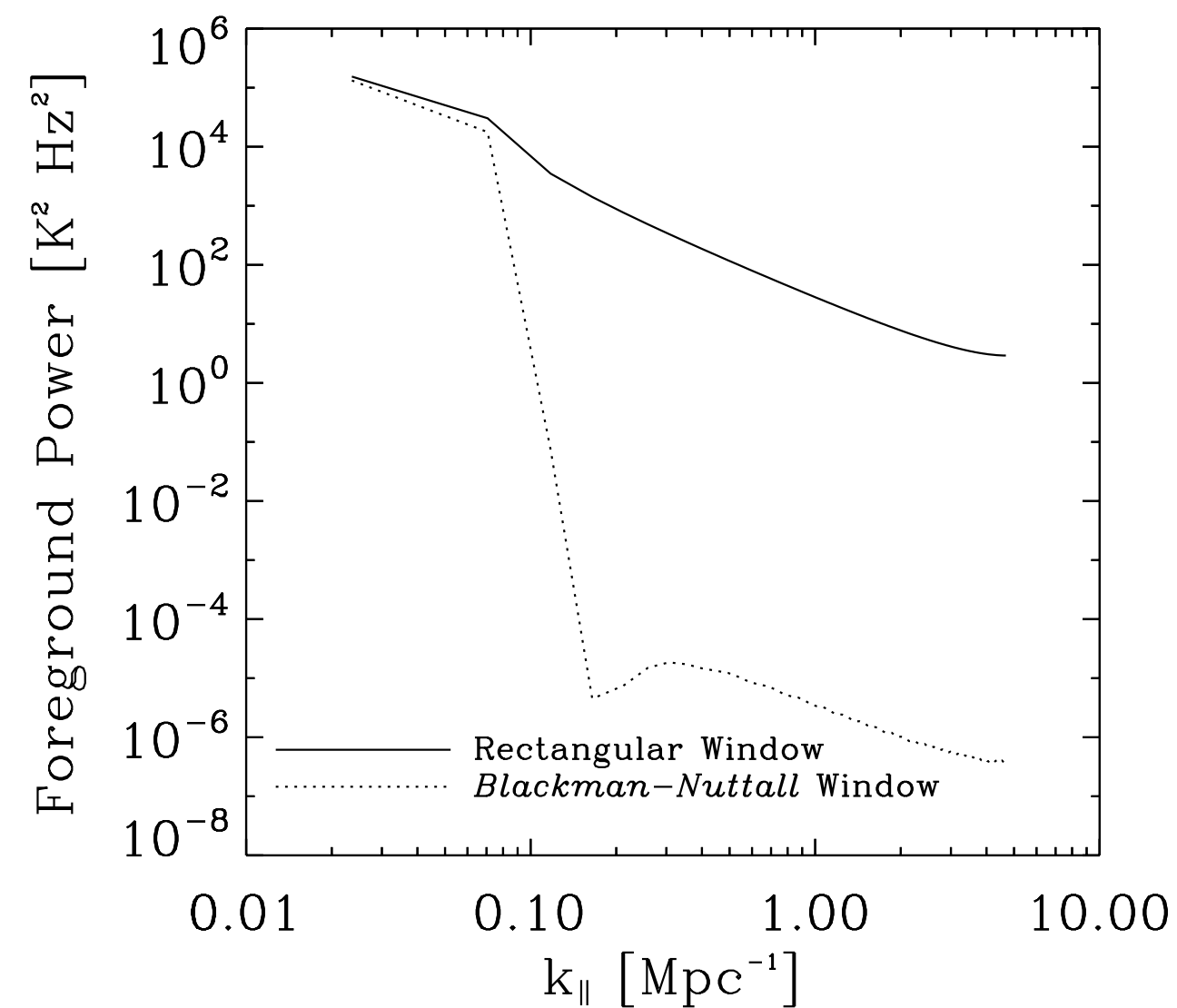
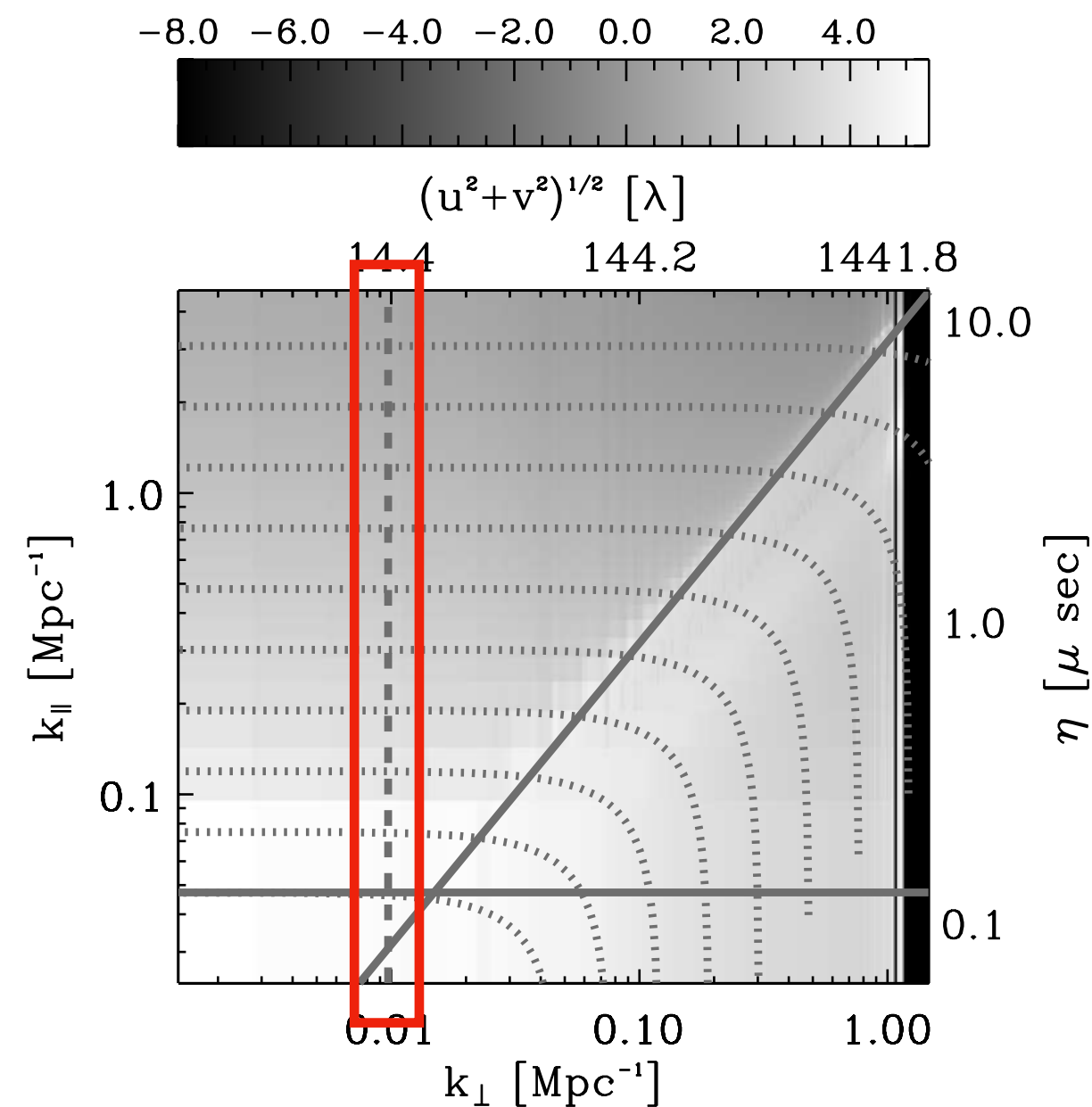
(i) NS slice of S08XX [zenith]



モデル(赤)と実測値(緑)

Filtering

前景放射を21cm線と分離するには
適切なフィルターを選ぶ必要がある
(Blackman-Harris window function)
(e.g. Thyagarajan + 2013, 2016)



RFIによるデータの欠損にも
対応できるようなフィルターの開発
(Ewall-wise+2020)

Physics of 21 cm

スピン温度

スピン温度はsingletとtripletの水素の数密度の比から定義される励起温度

$$\frac{n_1}{n_0} = \frac{g_1}{g_0} \exp \left(-\frac{E_{10}}{k_B T_S} \right)$$

詳細釣り合いの式より

$$n_1(C_{10} + P_{10} + A_{10} + B_{10}I_{\text{CMB}}) = n_0(C_{01} + P_{01} + B_{01}I_{\text{CMB}})$$

自発的遷移

衝突による遷移 (H-H, pH, eH)

ライマン α との散乱による遷移

CMBによる誘導遷移

衝突カップリング

$$n_1(C_{10} + P_{10} + A_{10} + B_{10}I_{\text{CMB}}) = n_0(C_{01} + P_{01} + B_{01}I_{\text{CMB}})$$

Collisions

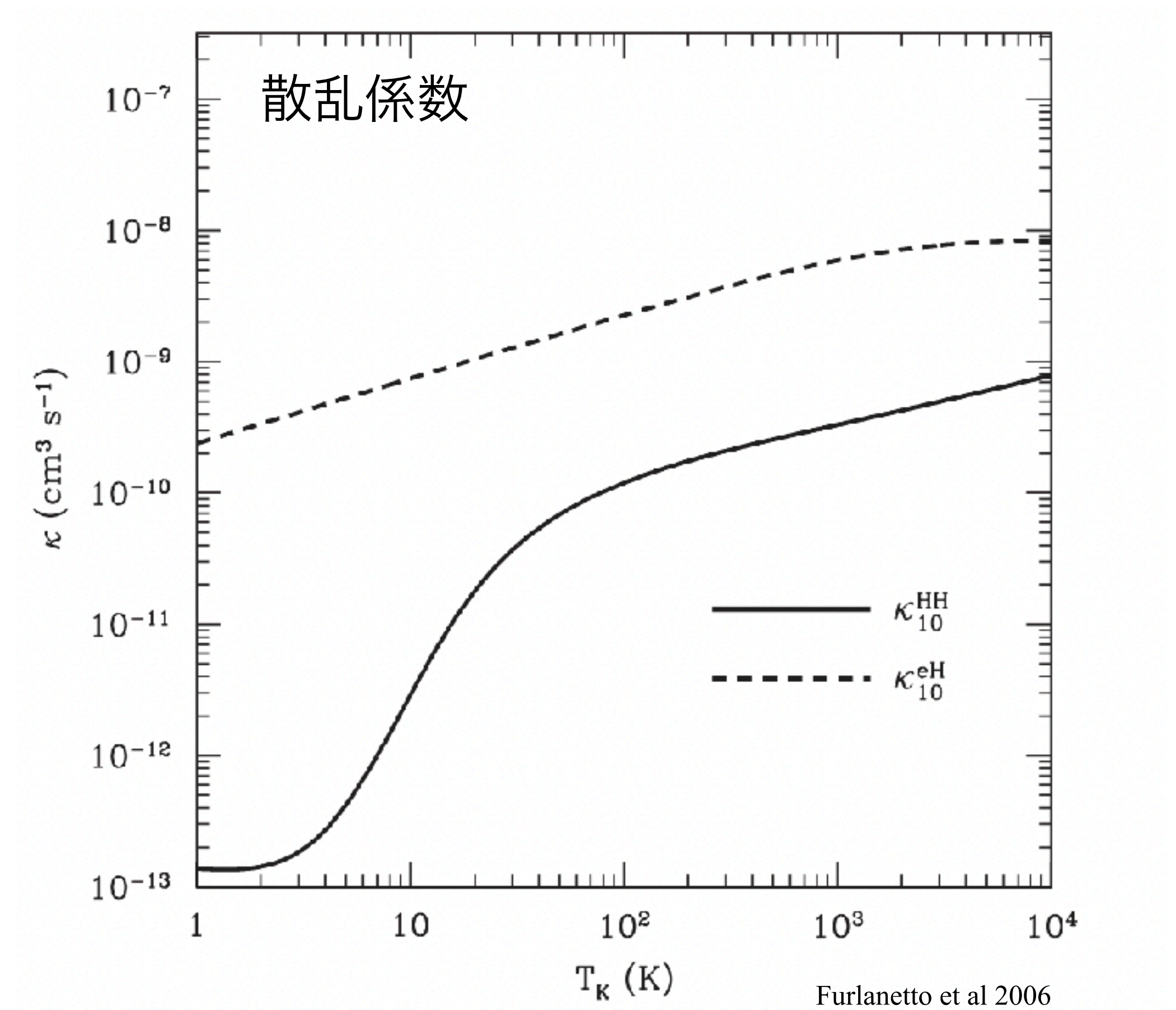
$$\frac{C_{01}}{C_{10}} = \frac{g_1}{g_0} e^{-T_\star/T_K} \approx 3 \left(1 - \frac{T_\star}{T_K} \right)$$

T_K : ガスの運動温度

電離前はHHの衝突がメイン
(ただ、宇宙膨張ですぐ効かなくなる)

原子との衝突結合定数

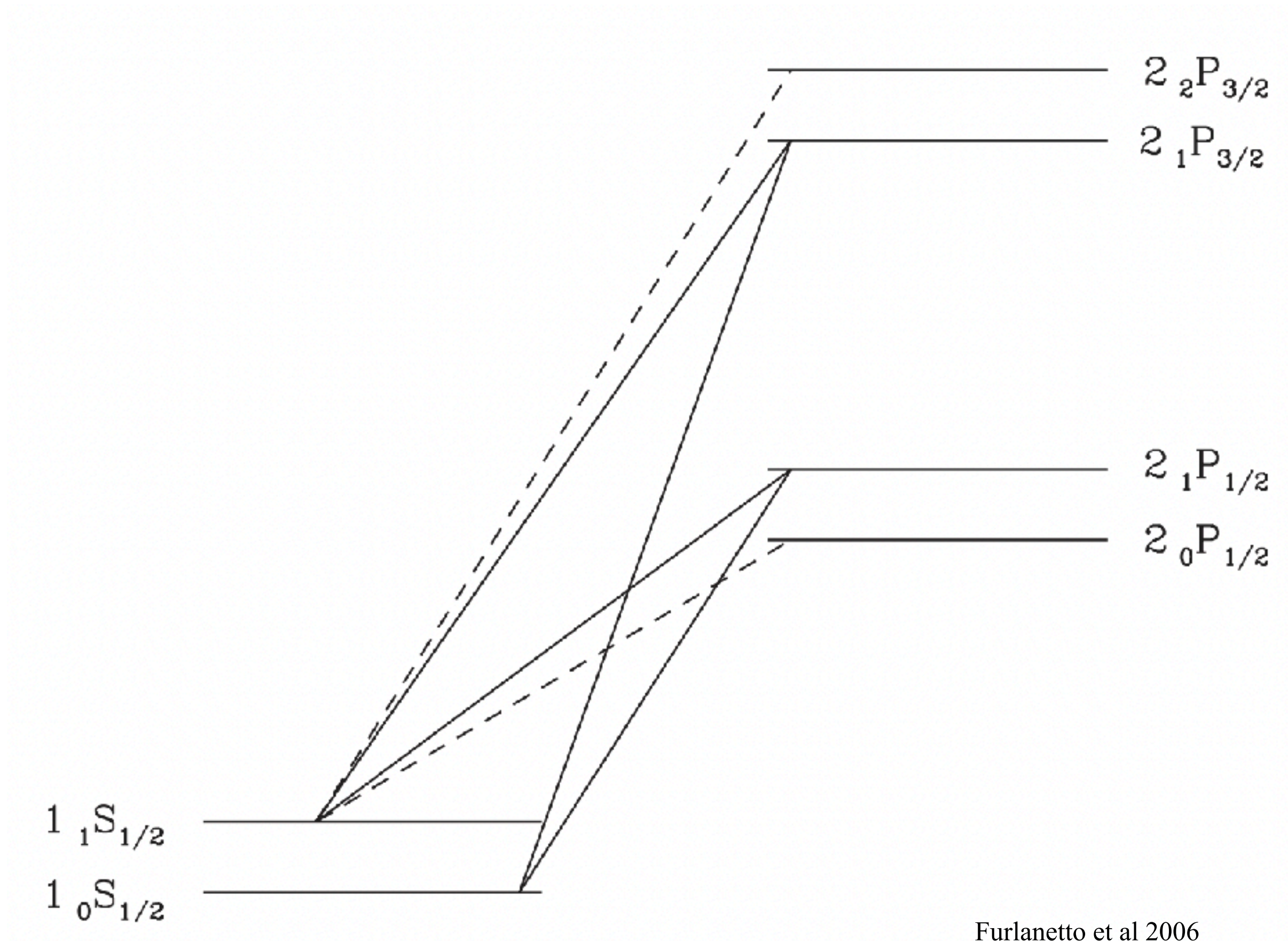
$$x_c \equiv \frac{C_{10}T_\star}{A_{10}T_\gamma}$$



WF効果

$$n_1(C_{10} + P_{10} + A_{10} + B_{10}I_{\text{CMB}}) = n_0(C_{01} + P_{01} + B_{01}I_{\text{CMB}})$$

Lyman- α 光による励起-脱励起でsinglet-triplet間の状態が変化



Furlanetto et al 2006

$$\frac{P_{01}}{P_{10}} \equiv 3 \left(1 - \frac{T_{\star}}{T_c} \right)$$

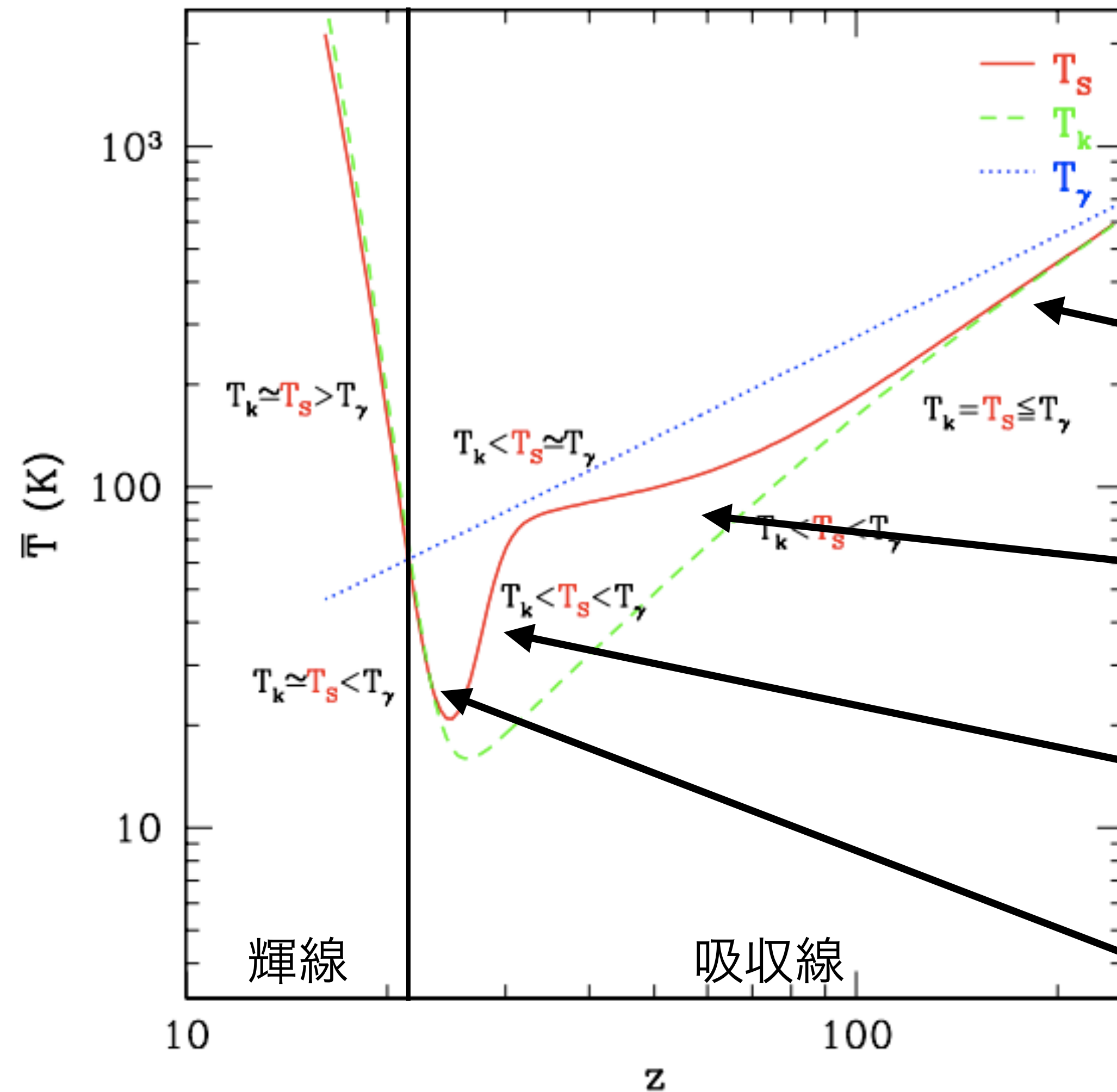
T_c : Color temperature

high- z ではHIの密度が高く散乱が
すぐに起きるので、 $T_c \approx T_K$

紫外線(Lyman- α)との衝突結合定数

$$x_{\alpha} \equiv \frac{P_{10}T_{\star}}{A_{10}T_{\gamma}}$$

スピン温度の進化



Messinger et al 2010

$$T_S^{-1} = \frac{T_\gamma^{-1} + x_c T_K^{-1} + x_\alpha T_c^{-1}}{1 + x_c + x_\alpha}$$

衝突カップリング

$$T_S = T_K$$

宇宙膨張により衝突が減るためCMB温度に近づく

$$T_K < T_S < T_\gamma$$

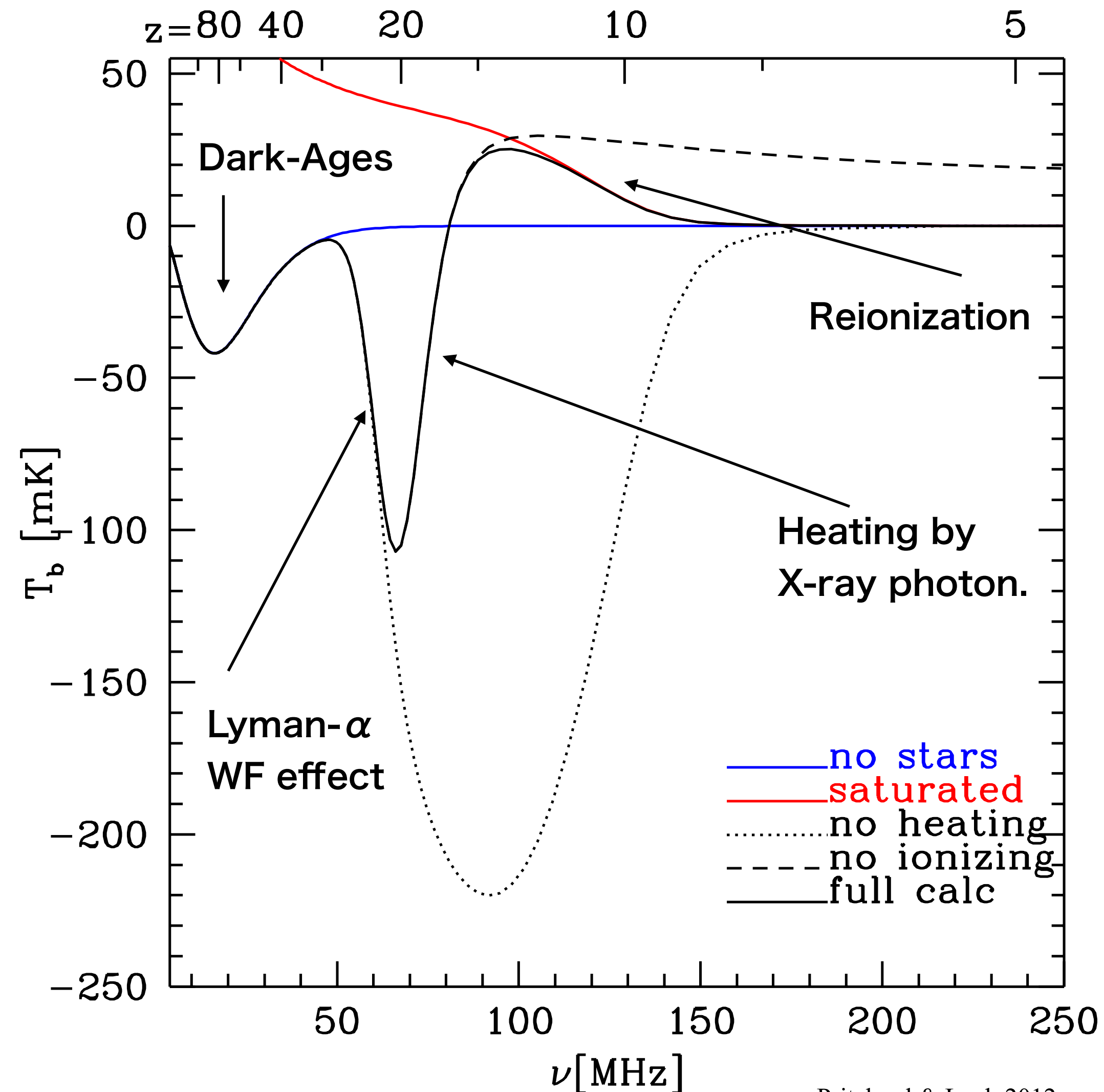
Lyman- α (WF effect) によってガス温度に近づく

$$T_K \approx T_S < T_\gamma$$

X-ray heatingによるガスの加熱に伴って
スピン温度も上昇

EDGESの解釈

21 cm線輝度温度グローバルシグナル

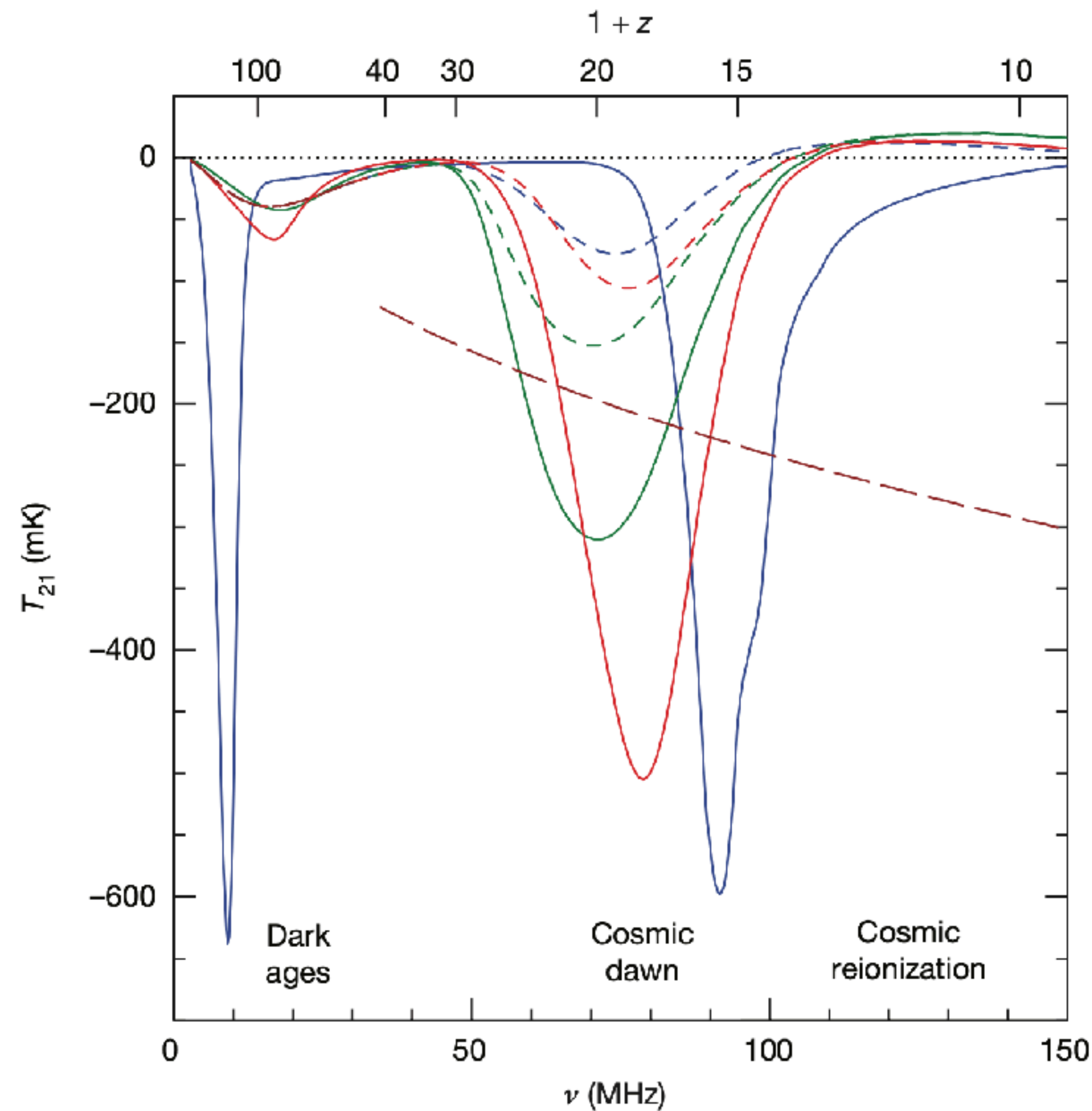


Pritchard & Loeb 2012

21 cm線のグローバルシグナル(~全天平均)は
初代星の生まれるタイミングや性質
銀河の電離に関わる性質によって異なる
右図はスタンダードなモデルと
いくつかの極端な例

ガスが加熱されず宇宙膨張で断熱的に冷えており
かつWF効果でスピン温度とガス温度がカップルして
いるモデルでは $z=18$ で吸収線がせいぜい-200mK

EDGESの解釈：DM-Baryon



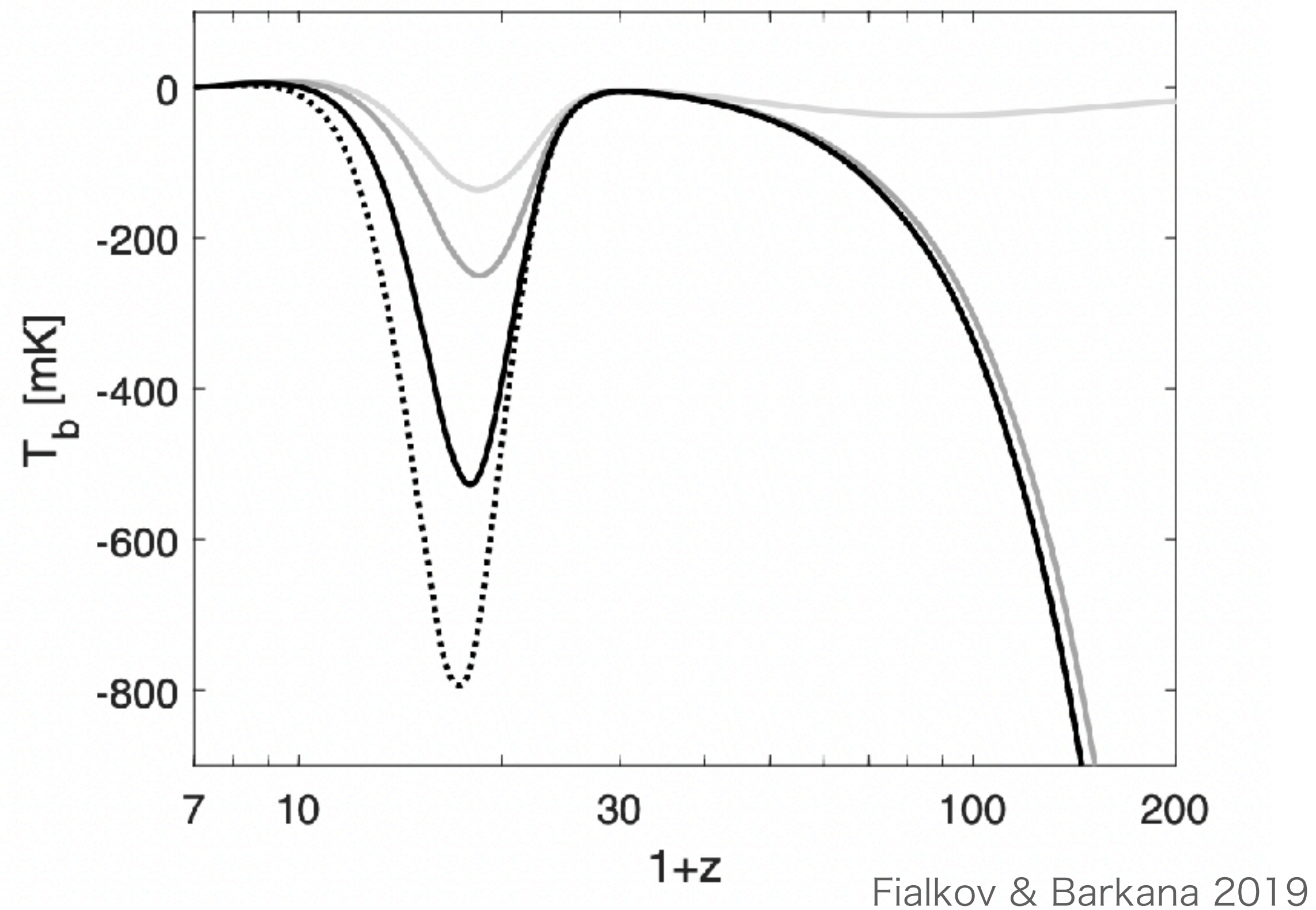
Barkana 2018

ガスよりも冷えていた可能性のあるものは
ダークマターしかない。

バリオンとダークマター間の弱い相互作用
(クーロンライクな)を仮定してなんとか冷やす

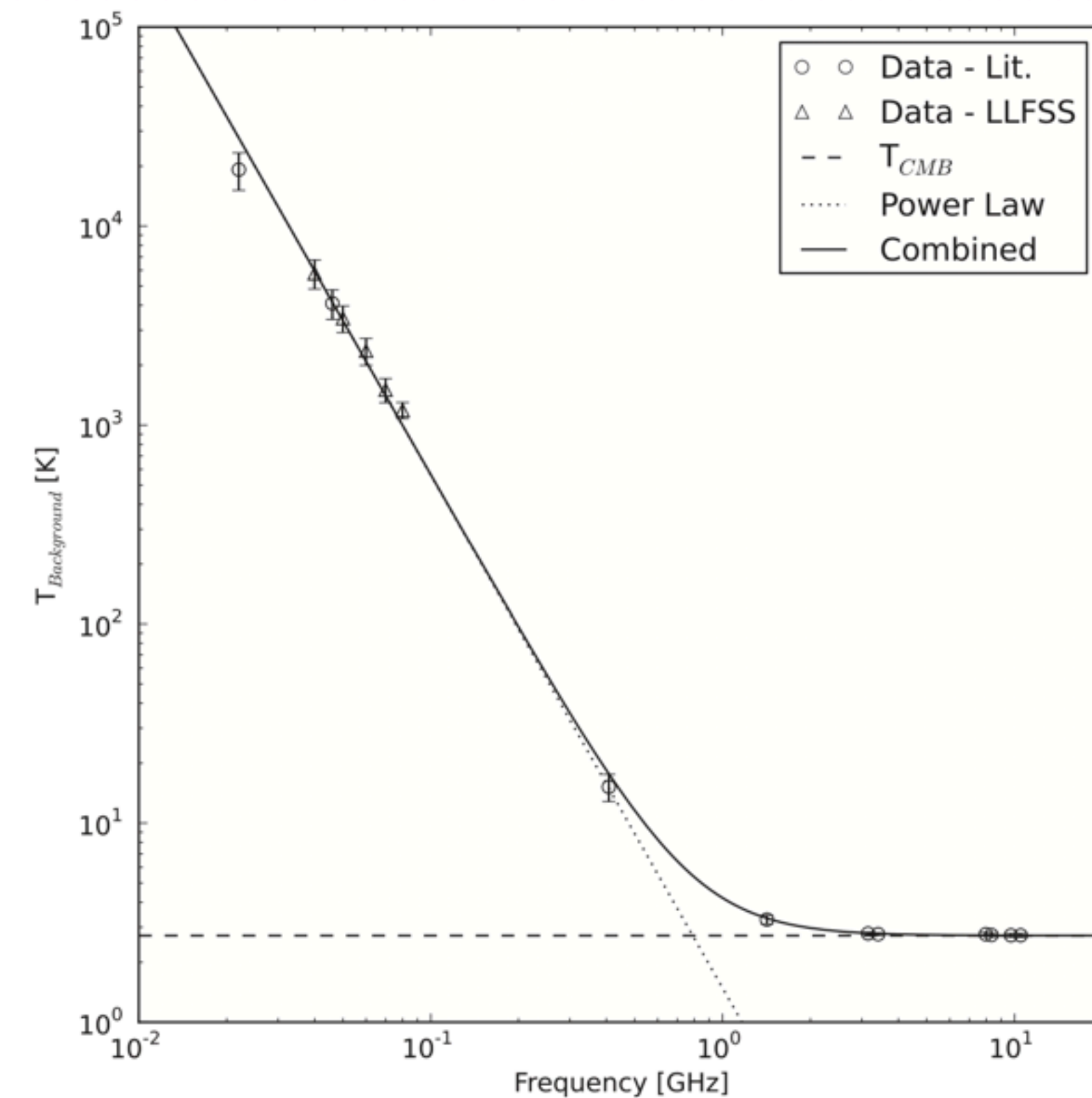
$$\sigma(\nu) = \sigma_c \left(\frac{\nu}{c} \right)^{-4} = \sigma_1 \left(\frac{\nu}{1 \text{ km s}^{-1}} \right)^{-4}$$

EDGESの解釈：電波背景放射



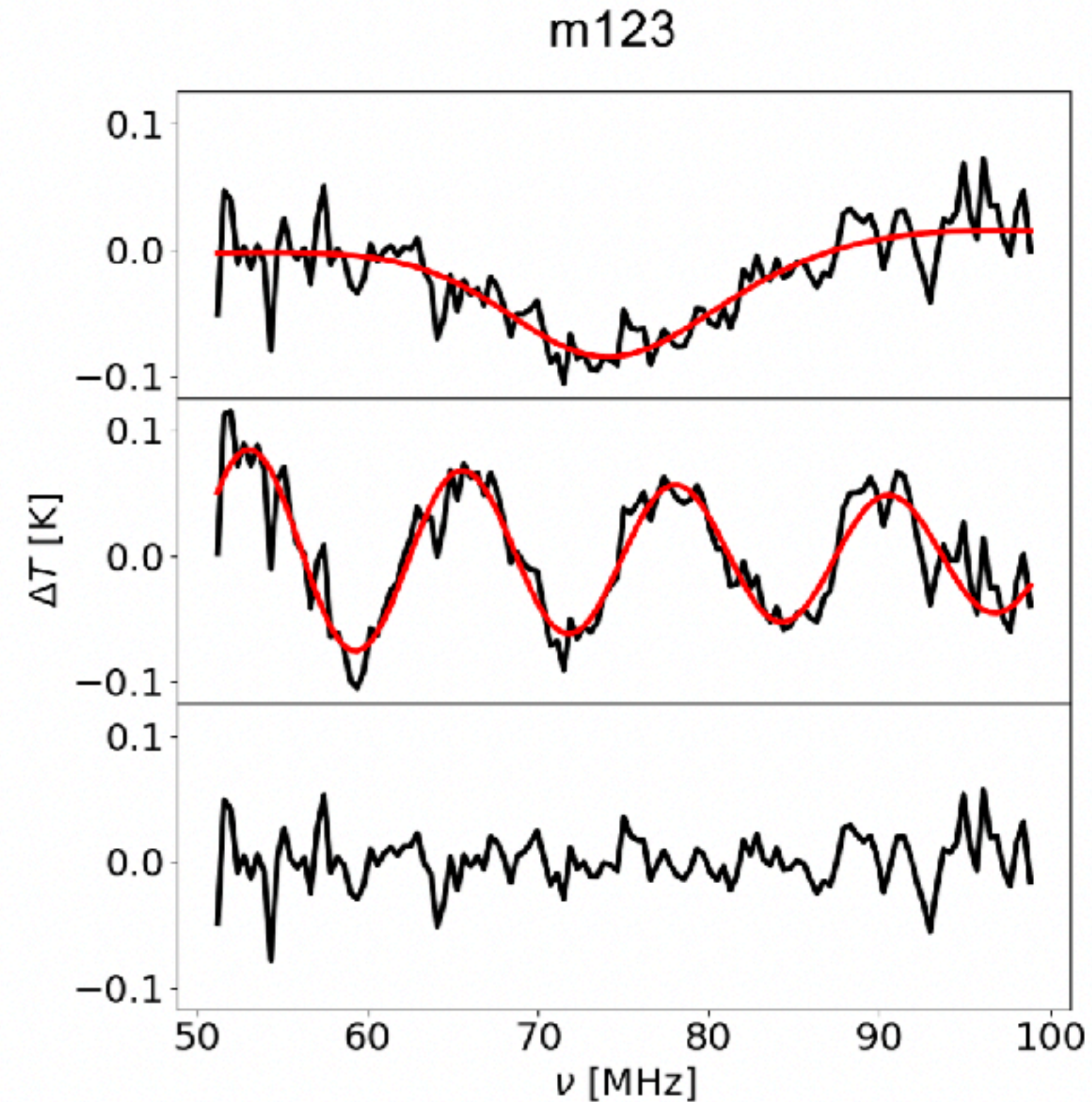
$z=18$ 以前に多数の電波源を仮定して
強い電波背景放射があると仮定

背景電波超過の報告？
低周波側の背景電波スペクトルを見ると
CMB以外の成分があるかもしれない？



Dowell & Taylor 2018

EDGESの解釈：解析の誤差



Sims & Pober 2019

そもそも困難な観測

- 非常に強い前景放射 +
- 電離層による放射/吸収 +
- FMラジオなどの人口電波の影響

万が一sinusoidalな系統誤差があると、21cm線は消える

EDGES論文では装置の応答など丁寧に取り扱っていて、装置の部品を変えてみたりと実験しているものの...

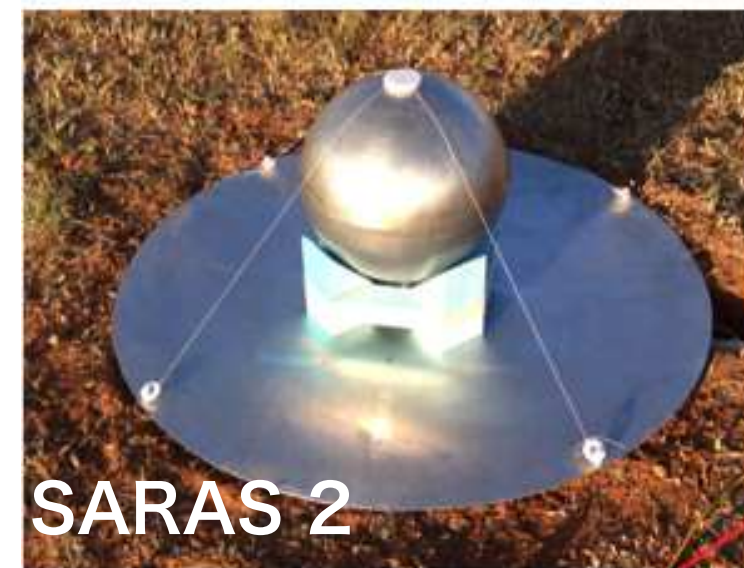
EDGES追観測の必要性

多数の装置+将来計画

地上からだったり

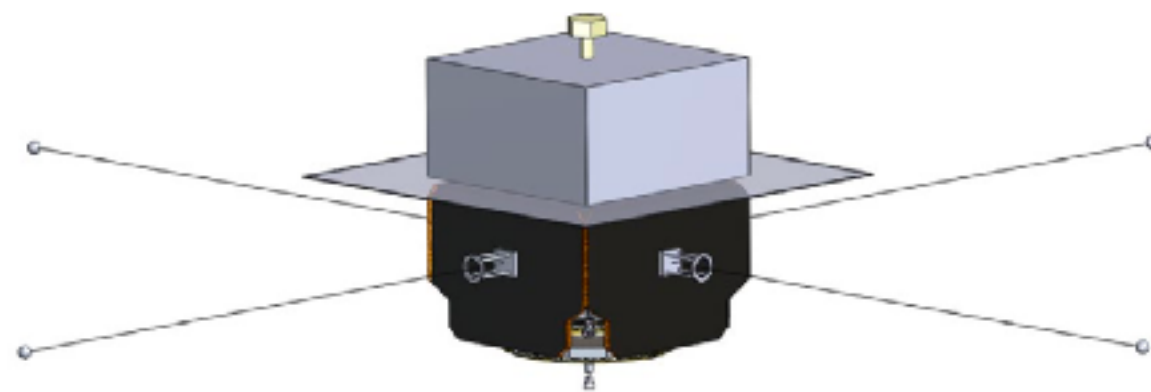


<http://www.tauceti.caltech.edu/leda/>



Singh et al 2017

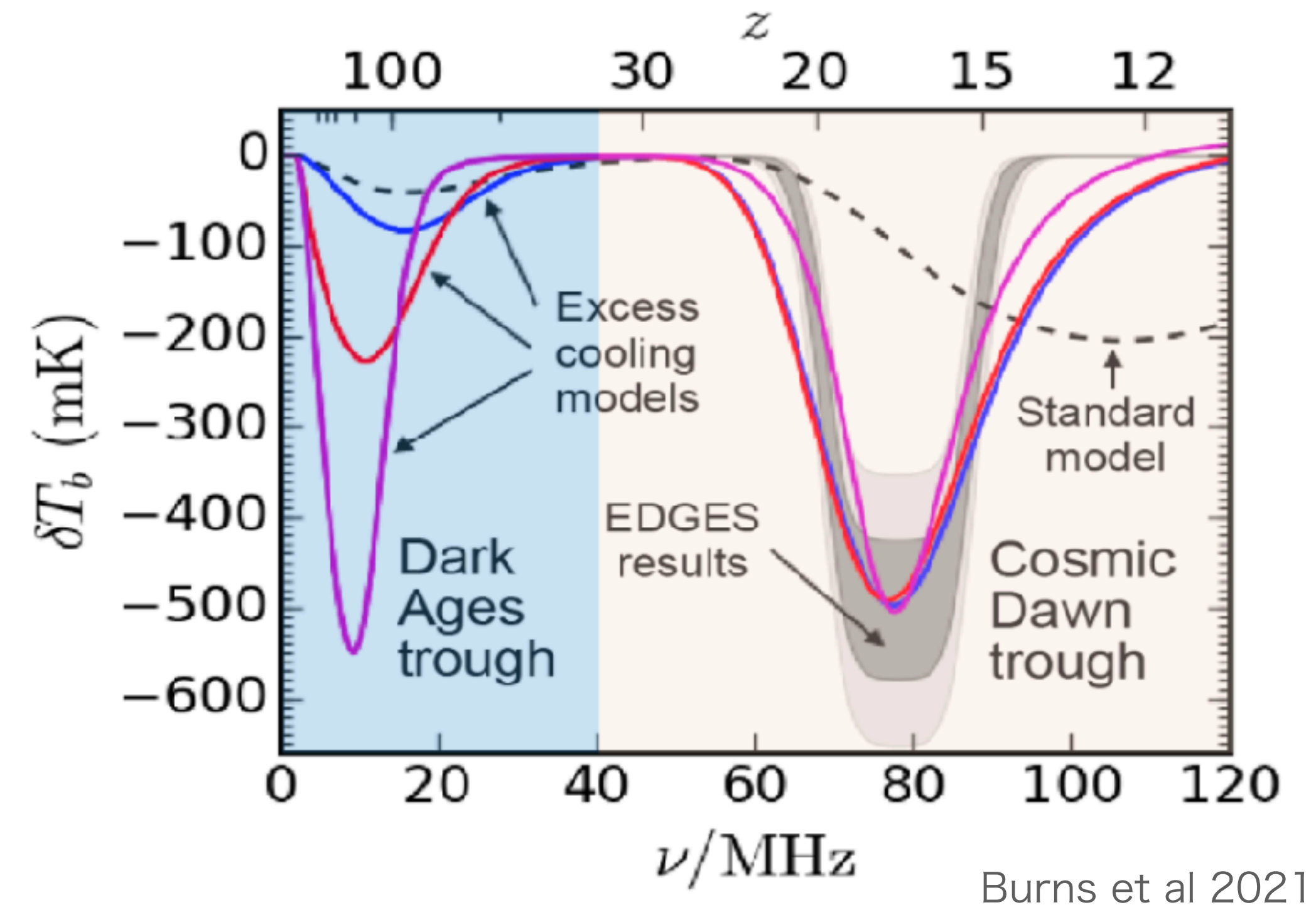
宇宙からだったり



DAPPER Burns et al 2019

EDGESを検証できる結果はまだ出ていない

暗黒時代の観測でも検証



EDGESの予言するモデルは暗黒時代にも標準的な宇宙論と異なる信号を予言する